



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A
ROBOTIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS

MĚŘENÍ NAPJATOSTI VE SPIRÁLE VODNÍ TURBÍNY POMOCÍ TENZOMETRŮ

*MEASUREMENTS OF THE STRESS IN THE TURBINE SPIRAL CASING USING THE STRAIN
GAUGES*

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

BC. PAVEL DOKOUPIL

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

DOC. ING. VLADIMÍR HABÁN, PH.D.

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky

Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Pavel Dokoupil

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Výrobní stroje, systémy a roboty (2301T041)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem c.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Měření napjatosti ve spirále vodní turbíny pomocí tenzometrů

v anglickém jazyce:

Measurements of the stress in the turbine spiral casing using the strain gauges

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Vodní turbíny jsou zatíženy statickým a dynamickým tlakem. Mezi nejvíce namáhané součásti patří i spirála vodní turbíny. Úkolem diplomanta bude stanovit namáhání v materiálu spirály vodní turbíny použitím tenzometricky snímačů. Diplomová práce bude obsahovat i rozbor nejistoty měření napětí pomocí tenzometrů.

Cíle diplomové práce:

Tenzometrickým měřením stanovit napjatost ve spirále.

Porovnat měření tlaku ve vodě s napjatostí ve spirále.

Rozbor nejistoty měření napjatosti.

Seznam odborné literatury:

Bude úkolem diplomanta provést literární rešerši problematiky.

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Vladimír Habán, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/14.

V Brně, dne 6.11.2013



doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
Ředitel ústavu



prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan

ABSTRAKT

Tato diplomová práce je zaměřena na měření napjatosti ve spirále vodní turbíny pomocí tenzometrů. Zpráva je rozdělena na dvě části a to na část teoretickou a část praktickou. V teoretické části je popsána teorie, která se vztahuje k zadanému tématu (kapitoly zabývající se základy mechaniky, měřením a vyhodnocením, tenzometrii, měřením tlaku, nejistotou měření) a dále pak kapitola, kde je popsáno vodní dílo Lipno nad Vltavou (podkapitoly zabývající se VE Lipno I její historii, problematikou a historií měření). V praktické části práce je proveden teoretický výpočet nejistot tenzometrického měření a zpracováno měření napjatosti na spirále Francisovy turbíny na vodní elektrárně Lipno I (soustrojí TG2). Měření je rozděleno na dvě části a to na měření před generální opravou a po generální opravě. V praktické části jsou popsány technická data jednotlivých spirál, popis měření, výsledky měření přetvoření a napjatosti včetně porovnání s tlakem ve spirále a výpočtem nejistot měření.

KLÍČOVÁ SLOVA

Měření, spirála, vodní turbína, tenzometr, přetvoření, napjatost, tlak, zkouška, vodní elektrárna Lipno I, nejistota měření

ABSTRACT

The Master's thesis is focused on measuring of the stress in the spiral case of water turbine using the strain gauges measurement. It contains the theoretical and the practical part. The theoretical part includes a description of theoretical background (basic mechanics, measurement and evaluation, strain gauges, pressure measurement, uncertainty of measurement). One of the chapters describes Water Power Plant Lipno nad Vltavou (history of power plant, issues and the history of measurement). The practical part contains a theoretical calculation of measurement uncertainty and measuring of stress on spiral case Francis turbine at Water Power Plant Lipno I (Unit TG2). Measurement was made before and after overhaul. There are described technical data of spiral cases, description of measurement, results of measuring of strain and stress including comparison with the pressure in spiral case and calculation of uncertainties of measurement.

KEYWORDS

Measurements, spiral case, water turbine, strain gauges measurements, strain, stress, pressure, test, Water Power Plant Lipno I, uncertainty of measurements

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

DOKOUPIL, P. Měření napjatosti ve spirále vodní turbíny pomocí tenzometrů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 144 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Vladimír Habán, Ph.D.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením doc. Ing. Vladimíra Habána, Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 30. května 2014

.....

Pavel Dokoupil

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval všem, kteří mi umožnili studium a podporovali při studiu. Velký dík pak patří mé přítelkyni za podporu a trpělivost v době studia. Děkuji mému vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Vladimíru Habánovi, Ph.D. za kladný přístup, odborné rady a ochotu při řešení problémů. Rovněž bych chtěl poděkovat svému zaměstnavateli za umožnění studia při zaměstnání a za povolení zpracovat výsledky z měření na VE Lipno I v mé diplomové práci.

OBSAH

Úvod	12
1 Zadání a cíle diplomové práce	13
1.1 Zadání	13
1.2 Cíle	13
2 Úvod do teorie a problematiky	14
2.1 Termíny, definice	14
2.2 Francisova turbína	14
2.3 Vodní dílo Lipno nad Vltavou	16
2.4 Vodní elektrárna Lipno I	17
2.4.1 Historie VE Lipno I	18
2.4.2 Problematika VE Lipno I	20
2.4.3 Historie měření na TG1 a TG2	21
3 Základy mechaniky	24
3.1 Deformace tělesa	24
3.2 Napjatost tělesa	24
3.2.1 Hlavní rovina, Hlavní přetvoření, hlavní napětí, hlavní směry	24
3.2.2 Dvojosá (rovinná) napjatost (přetvoření)	25
3.2.3 Mohrova kružnice pro rovinou napjatost	26
3.3 Pevnost, redukované napětí, bezpečnost	27
3.4 Zatížení tělesa, mezní stavy tělesa, životnost	28
3.5 Materiálové charakteristiky	29
3.5.1 Oblast pružných deformací	30
3.5.2 Oblast rovnoměrných pružně plastických deformací	30
3.5.3 Oblast nerovnoměrných pružně plastických deformací	30
4 Měření a vyhodnocení	31
4.1 Experiment a měření	31
4.1.1 Experiment	31
4.1.2 Měření	32
4.2 Analýza a zpracování signálu	33
4.2.1 Signál	33
4.2.2 Vzorkování	33
4.2.3 Fourierova transformace	33
4.2.4 Snímač	34
4.3 Měřicí systémy	34
4.3.1 Měřicí ústředna EMS DV 803	35

4.3.2	Program NextView	37
5	Tenzometrie	38
5.1	Princip odporových tenzometrů	38
5.2	Základní parametry (vlastnosti) odporových tenzometrů	39
5.3	Rozdělení odporových tenzometrů	44
5.3.1	Kovové	44
5.3.2	Polovodičové	46
5.4	Druhy a typy používaných odporových tenzometrů	47
5.4.1	Jednoosá napjatost	47
5.4.2	Rovinná napjatost	47
5.4.3	Gradient napětí	50
5.4.4	Vlastní (remanentní) napjatost	51
5.4.5	Snímače pro měření velkých prodloužení	52
5.4.6	Snímače pro měření za vysokých teplot	52
5.4.7	Snímače únavové životnosti	53
5.5	Instalace odporových tenzometrů	53
5.6	Zapojování tenzometrů	59
5.6.1	Základní popis Wheatstonova mostu	59
5.6.2	Způsoby zapojení tenzometrů do můstku	61
6	Měření tlaku	62
6.1	Tlak	62
6.2	Rozdělení snímačů tlaků (tlakoměrů)	63
6.3	Deformační tlakoměry	65
6.3.1	Tlakoměry s odporovými tenzometry	65
6.3.2	Tlakoměry piezoelektrické a piezorezistivní	66
6.3.3	Snímače s kapacitními čidly	66
6.3.4	Snímače optické	67
6.4	Tlakoměry s elektrickým výstupem	67
6.5	Kalibrace tlakových snímačů	71
6.6	Instalace tlakových snímačů	72
7	Nejistoty měření	74
7.1	Zdroje nejistot měření	75
7.2	Zásady pro udávání odhadů a jejich nejistot	75
7.3	Standartní nejistota stanovená metodou A	76
7.3.1	Určení při přímé metodě měření	76
7.3.2	Určení při nepřímé metodě měření	76

7.4	Standartní nejistota stanovená metodou B.....	77
7.4.1	Určení při přímé metodě měření.....	77
7.4.2	Určení při nepřímé metodě měření.....	80
7.5	Kombinovaná standartní nejistota	80
7.6	Rozšířená nejistota měření.....	81
8	Nejistota tenzometrického měření	82
8.1	Stanovení nejistoty přetvoření metodou B.....	82
8.1.1	Zdroje dílčích nejistot přetvoření typu B.....	82
8.1.2	Výpočet Nejistoty přetvoření typu B.....	85
8.2	Stanovení nejistoty napětí metodou B	85
8.2.1	Zdroje dílčích nejistot napětí typu B	86
8.2.2	Výpočet nejistoty napětí typu B pro jednoosou napjatost	86
8.2.3	Výpočet nejistoty napětí typu B pro dvojosou napjatost.....	86
8.2.4	Výpočet nejistoty napětí typu B pro redukované napětí.....	87
8.3	Rozšířená nejistota měření pro tenzometrické měření.....	88
8.4	Udávání výsledků analýzy nejistot pro tenzometrické měření	88
9	Měření na spirále před generální opravou	90
9.1	Základní technická data	90
9.1.1	Parametry.....	90
9.1.2	Spirální skříň	91
9.2	Popis zkoušek	92
9.2.1	Časový harmonogram a personální obsazení zkoušek	92
9.2.2	Rozmístění snímačů.....	92
9.2.3	Fotodokumentace	93
9.3	Rozbor měření.....	94
9.3.1	Popis měřených stavů	94
9.3.2	Tenzometrické měření	95
9.3.3	Měření tlaku.....	95
9.3.4	Měření ostatních veličin	95
9.4	Výsledky měření	96
9.4.1	Tenzometrické	96
9.4.2	Tlakové	99
9.4.3	Ostatní.....	99
9.4.4	Komplexní	99
9.5	Porovnání měření tlaku ve vodě s napjatostí ve spirále.....	100
9.6	Výpočet nejistot měření	102

9.6.1	Nejistota tenzometrů.....	102
9.6.2	Nejistota ostatních veličin	109
9.7	Zhodnocení výsledků měření.....	109
10	Měření na spirále po generální opravě	110
10.1	Základní technická data.....	110
10.1.1	Parametry.....	110
10.1.2	Spirální skříň	110
10.2	Popis zkoušek.....	112
10.2.1	Časový harmonogram a personální obsazení zkoušek	112
10.2.2	Rozmístění snímačů.....	112
10.2.3	Fotodokumentace	113
10.3	Rozbor měření.....	114
10.3.1	Popis měřených stavů	114
10.3.2	Tenzometrické měření	115
10.3.3	Měření tlaku.....	115
10.3.4	Měření ostatních veličin	115
10.4	Výsledky měření	116
10.4.1	Tenzometrické	116
10.4.2	Tlakové	118
10.4.3	Ostatní.....	118
10.4.4	Komplexní	118
10.5	Porovnání měření tlaku ve vodě s napjatostí ve spirále	119
10.6	Výpočet nejistot měření	120
10.6.1	Nejistota tenzometrů.....	120
10.6.2	Nejistota ostatních veličin	127
10.7	Zhodnocení výsledků měření	127
	Závěr.....	128
	Seznam použitých zkratk a symbolů	134
	Seznam obrázků.....	141
	Seznam tabulek.....	143
	Seznam grafů	143
	Seznam příloh.....	144

ÚVOD

Využití vodních toků patří odedávna k základním a velmi důležitým zdrojům energie. V současnosti se z vodních zdrojů v ČR vyrábí zhruba 5 % elektřiny, která je nejekologičtější a patří do skupiny obnovitelných zdrojů energie. Elektřina z vodních zdrojů se vyrábí ve vodních elektrárnách. Vodní elektrárna je tvořena třemi základními částmi, které jsou stavební (přehrada), strojní (turbína) a elektrická (generátor). Ačkoliv je každá vodní turbína po projekční stránce odlišná, tak mají některé součásti společné. Mezi součásti, které jsou pro všechny vodní turbíny společné, patří spirála a oběžné kolo (obě součásti jsou po konstrukční stránce odlišné pro různé typy vodních turbín). Spirála vodní turbíny patří mezi nejvíce namáhané součásti, kde zatížení vzniká od tlaku vody, která působí na vnitřní stranu spirály.

V současnosti je jednou z nejdůležitějších činností konstruktérů a výpočtářů navrhovat součásti tak, aby snesly zatížení po dobu své životnosti a zároveň byl návrh co nejvýhodnější po ekonomické stránce. Návrh součástí je v dnešní době realizován zejména za pomoci výpočetních programů. Výpočtové modely se s pomocí matematiky a fyziky dostaly na takovou úroveň poznání, že konstruktéři a výpočtáři věří naprosto bezmezně svým návrhům. Avšak i sebelepší matematický model nedokáže v dnešní době nahradit skutečné chování součástí. Z těchto poznatků plyne, že experimentální měření má i dnes svoje nezastupitelné místo v návrhu a dále pak při kontrole navrhované součásti.

U součástí, které jsou namáhány cyklicky statickým a dynamicky tlakem má experimentální mechanika další nezastupitelný úkol a to při posuzování bezporuchovosti strojů a dílců. Měření mechanických veličin se provádí v různých životních fázích stroje a výsledky z měření slouží jako podklady pro výpočtáře, kteří počítají bezpečnost a životnost součástí a strojů.

Životnost a bezpečnost patří k jednomu z největších problémů spolehlivosti stroje. Překročení bezpečnosti, nebo vyčerpání životnosti mívá často za následek destruktci stroje a s tím související následky. Z historie je známo mnoho případů, kdy byla porušena bezpečnost a následně došlo k haváriím, které měly katastrofální dopad na lidské životy, materiální škody, ale i ekologii. Jako příklad jsem zvolil havárii vodní elektrárny Sajano-Sušenskaja v Rusku, která se stala 17. srpna 2009. Následky byly katastrofální. 76 lidí přišlo o život, oprava elektrárny bude trvat přibližně 5 let a náklady na její opravu se odhadují na 1,3 miliardy dolarů. Elektrárna nebude dlouhou dobu vyrábět elektrický proud, což ohrožuje místní hliníkářny, které spotřebovávají 70 % výroby celé hydroelektrárny. Do řeky se během havárie uvolnily 40 tun oleje, které kontaminovaly vodu a okolní přírodu. Za příčinu neštěstí byly označeny technické nedostatky. Na turbogenerátoru č. 2 probíhala do března 2009 oprava a při zkouškách, které se konaly od dubna do července, se objevovaly vibrace přesahující dovolenou bezpečnostní úroveň. 16. srpna byla přes úvodní problémy spuštěna, ale vibrovala 4x více než dovozovaly limity. Chvění začalo uvolňovat šrouby a celé soustrojí se uvolnilo ze svého lože a tlak vody v přívaděči doslova „vystřelil“ turbínu vzhůru. Na závěr lze jenom dodat, že turbíně bylo v okamžiku havárie 29 let a 10 měsíců a výrobce dával stroji záruku 30 let.

Úvod bych zakončil mottem, které nejlépe vyjadřuje postoj k měření.

„Měř vše co je měřitelné a neměřitelné učin měřitelným“.

Galileo Galilei (*1564-†1642)

1 ZADÁNÍ A CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

1.1 ZADÁNÍ

- a) Tenzometrickým měřením stanovit napjatost ve spirále.
- b) Porovnat měření tlaku ve vodě s napjatostí ve spirále.
- c) Rozbor nejistot měření napjatosti.

1.2 CÍLE

Hlavním cílem diplomové práce je experimentální stanovení napjatosti na spirále vodní turbíny. Aby bylo možné tento cíl splnit v celém rozsahu je zapotřebí nejprve zformulovat teorii k zadání diplomové práce. Vzhledem k rozsáhlé a komplexní problematice nelze v diplomové práci postihnout všechnu teorii, která je spojena s měřením, vyhodnocením a základní teorii spirál energetických strojů. Při vytváření diplomové práce bude teorie vyselektována jen na základní a nezbytné kapitoly, které jsou nutné k měření, vyhodnocení a pochopení zadané problematiky. Mezi základní kapitoly, které předpokládám, že jsou stěžejní patří teorie základů mechaniky, tenzometrie, měření tlaku, nejistoty měření, měření a vyhodnocení. Teorie bude dále sepsána dle předpokladu, že se budu dále věnovat experimentální mechanice a proto budou vybrané kapitoly sepsány tak, aby postihly co nejvíce poznatků, se kterými budu následně dále pracovat. Druhý předpoklad pro splnění zadání je experimentální měření na spirále vodní turbíny. Před začátkem prací na diplomové práci se nabízelo několik možností jak a kde změřit napjatost na spirále vodní turbíny. Pro potřeby práce bude zvolené měření na spirále Francisovy turbíny vodní elektrárny Lipno I a to hned z několika důvodů. Ten nejdůležitější důvod je ten, že v letech 2012 až 2014 probíhá rekonstrukce (generální oprava) zmíněné elektrárny a já jakožto zaměstnanec akreditované zkušební laboratoře ÚAM Brno jsem se podílel v rámci plnění pracovních povinností na měření a vyhodnocení mechanických veličin na spirále soustrojí TG2 zmíněné elektrárny a to před rekonstrukcí v roce 2012 i po rekonstrukci v roce 2014. Se zvolením zmíněné spirály nastává potřeba formulace dalšího cíle a to popis vodního díla Lipno nad Vltavou zejména pak VE Lipno I a to včetně problematiky a bohaté historie měření na soustrojích TG1 a TG2.

Cíle, které se vztahují k měření a vyhodnocení jsou následující:

- a) Tenzometrickými snímači stanovit přetvoření a napjatost na spirále VE Lipno I a to před a po GO.
- b) Výpočet nejistot měření přetvoření a napětí na spirále. Předpokládá se, že výpočet provedu jenom pro tenzometrické snímače a výpočet bude proveden, tak aby se dal později aplikovat na další tenzometrické měření.
- c) Porovnání tlaku ve vodě s napjatostí ve spirále. Předpokládám, že při porovnání měření tlaku vody ve spirále se podaří najít závislost mezi mechanickými změnami na povrchu spirály a změnami tlaku uvnitř spirály.
- d) Porovnání měření a naměřených dat na spirále před a po GO.

2 ÚVOD DO TEORIE A PROBLEMATIKY

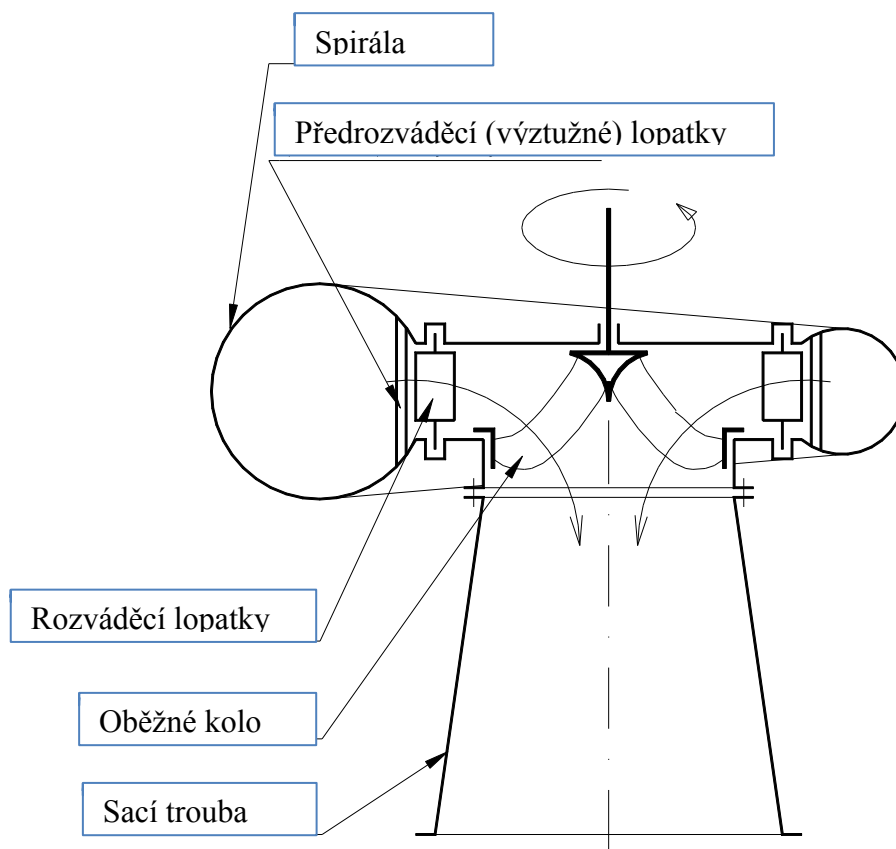
První kapitola je rozdělena na dva logické celky. V prvním celku jsou popsány základní termíny a definice. Ty jsou voleny tak, aby co nejvýstižněji a nejstručněji dokázaly charakterizovat zadání a cíle diplomové práce. Další termíny a definice jsou popsány v následujících kapitolách a dále pak v odborné literatuře viz použité informační zdroje. Ve druhém celku je pak detailně popsáno Vodní dílo Lipno nad Vltavou a vodní elektrárna Lipno I.

2.1 TERMÍNY, DEFINICE

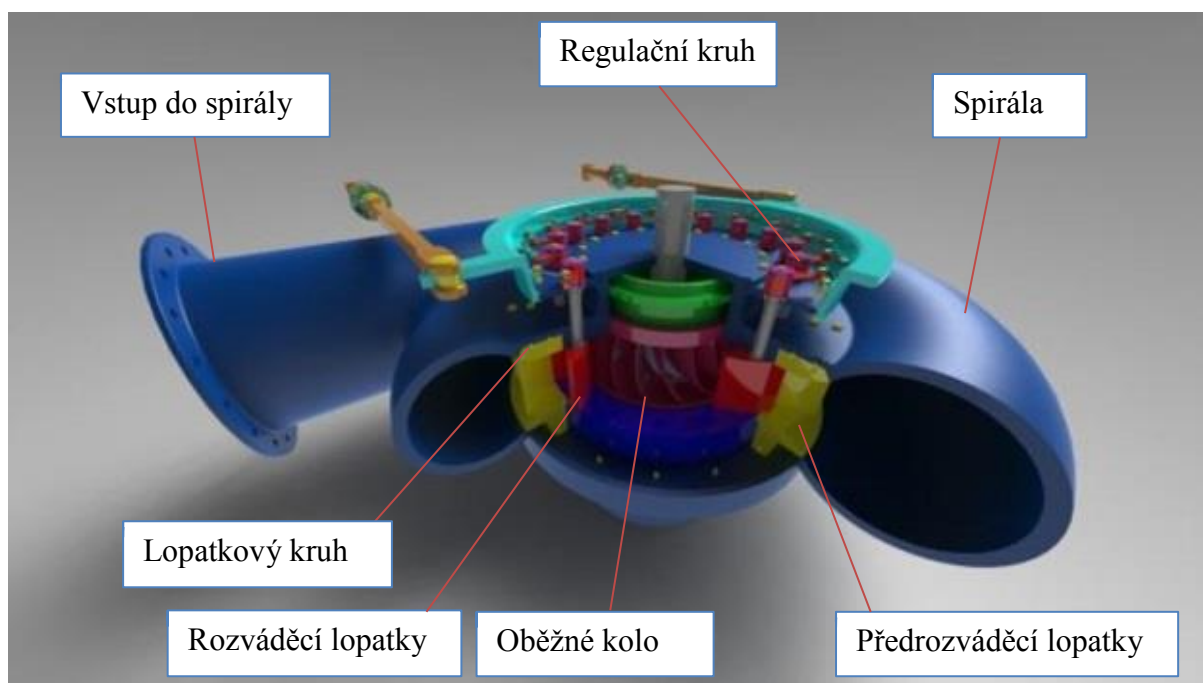
- **Vodní turbína** je rotační hydraulický stroj, sloužící k přeměně hydraulické energie v energii mechanickou. [12]
- **Spirála** je uzavřená vstupní komora přivádějící vodu k oběžnému kolu, nebo výstupní komora odvádějící vodu za oběžným kolem. Její vnější stěna má spirálový tvar. [12]
- **Napjatost tělesa** je množina napjatostí ve všech bodech tělesa. Je určena tenzorovým polem a závisí na tvaru tělesa, zatížení tělesa a vlastnostech materiálu tělesa. [1]
- **Měření** je poznávací proces, jehož prvořadým cílem je zjištění výskytu a velikosti měřené veličiny při využívání známých fyzikálních jevů a zákonů.
- **Tenzometr** je pasivní elektrotechnická součástka používaná k nepřímému měření mechanického napětí na povrchu součásti. Prostřednictvím měření je deformace.
- **Nejistota měření** je rozsah hodnot, v nichž se může měřená hodnota s určitou jistotou pohybovat.
- **Tlak** je jednou ze základních fyzikálních veličin v technice. Je stavovou veličinou, která určuje stav látek. Všechny tekutiny v kapalném nebo plynném skupenství působí určitým tlakem na stěny nádoby, ve které jsou uzavřeny, nebo působí na stěny tělesa do nich ponořeného. [52]

2.2 FRANCISOVA TURBÍNA

FT je přetlaková radiálně-axiální turbína s jedním regulačním orgánem, kterým jsou lopatky RK. Zavřená poloha lopatek RK je při $a_0=0$ a maximální otevření RK je dáno požadovaným výkonovým rozsahem dané VE nebo křivkou omezení použitelnosti (ve specifikovaném spádovém rozsahu), za kterou již výkon stroje klesá. FT jsou nejrozšířenějším druhem turbíny. Jednotlivé typy FT jsou odlišeny rychloběžností, podle které rozlišujeme tzv. turbíny pomaloběžné, normální, rychloběžné a expresní. Používají se především pro střední stabilní Q a střední H. Jsou výhodné zejména u přečerpávacích elektráren, kde lze turbínu zapojit jako čerpadlo. Varianty: klasická FT spirální, FT kašnová, Čerpadlová turbína (reverzní), Reiffensteinova turbína, Kvjatkovského turbína. FT byla vyvinuta americkým vynálezcem Jamesem B. Francisem v roce 1848. [34]



Obr. 2.1: Schéma Francisovy turbíny [34]



Obr. 2.2: Model Francisovy turbíny v programu Solidworks

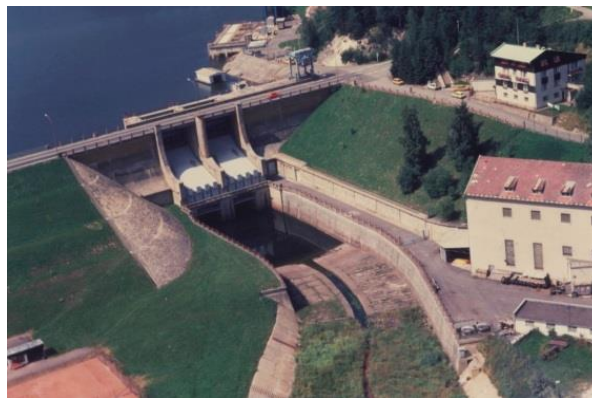
- **Spirální skříň** je ocelová nebo litinová spirála, jejíž průtočný průřez je zpravidla kruhový. Rozděluje vodu rovnoměrně po obvodě rozváděcího kola. [12]
- **Lopátkový kruh** je část spirální skříně, která sestává ze dvou kruhů spojených předrozváděcími (výztužnými) lopatkami. [12]
- **Předrozváděcí výztužná lopatka** je pevná lopatka hydraulického tvaru, sloužící jednak k usměrnění vody na lopatky rozváděcího kola a na spojení a vyztužení obou kruhů lopátkového kruhu spirály. [12]

2.3 VODNÍ DÍLO LIPNO NAD VLTAVOU

Někdy označované jako Lipenská přehrada, leží v Jihočeském kraji. Byla vybudovaná na řece Vltavě v letech 1951 – 1959. S rozlohou 48,7 km² se jedná o největší přehradní nádrž a zároveň největší vodní plochu v ČR. Je tvořena dvěma vodními nádržemi s elektrárnami Lipno I a Lipno II. Lipno I, jako hlavní z obou elektráren, je akumulční špičková, VE. Lipno II, položená 12 km níže po toku Vltavy, slouží k vyrovnání kolísání jejího odtoku. Ze 2/3 sypaná hráz (zbytek hráze je gravitační betonová se dvěma bloky, kde jsou základové výpustě a přelivová pole) slouží k zadržování vodní masy. Hráz je dlouhá 296 m a její výška je 26 m. Lipenská přehrada je součástí Vltavské kaskády. Do vltavské kaskády patří celkem 9 přehrad, které produkují výkon až 750 MW. Lipenská přehrada byla postavena především z důvodu vodohospodářských a energetických, ale neslouží jen jako zdroj levné ekologicky čisté energie, ale také jako turistické, rekreační a sportovní středisko. [40] [44]



Obr. 2.3: Letecký pohled na Lipenskou přehradu [44]



Obr. 2.4: Letecký pohled na hráz Lipenské přehrady [44]

2.4 VODNÍ ELEKTRÁRNA LIPNO I

Je podzemní špičková elektrárna s přivaděči švédského typu ke dvěma FT o parametrech: $P = 2 \times 60 \text{ MW}$; $Q = 2 \times 46 \text{ m}^3/\text{s}$; $H = (148 \div 162) \text{ m}$. [11]

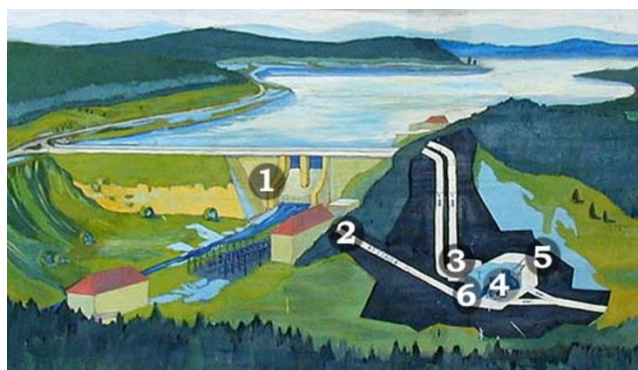
Výkon elektrárny se využívá pro regulaci celostátní energetické soustavy a výrazně ovlivňuje výkonovou bilanci elektrizační soustavy ČR. Elektrárna dokáže najet na plný výkon 120 MW do 150 vteřin a je ovládaná z centrálního dispečinku vodních elektráren ve Štěchovicích. Každé soustrojí (TG1, TG2) se dá ovládat samostatně a to i z místního ovládání. Každé soustrojí za rok najede přibližně 600krát. [44]

Nachází se v podzemní kaverně, která byla uměle vylámaná ve skalním masivu v hloubce 160 m pod terénem a v blízkosti hráze. Kaverna má délku 65,12 m, šířku 21,52 m a max. výšku 38,6 m. [40]

Voda z přehrady je vedena přes vtokový objekt s česlicovými poli dvěma svislými šachtami o $\varnothing 6 \text{ m}$, roztečí 20 m a délkou 160 m, kde jsou zabetonovaná ocelová potrubí o $\varnothing 4,5 \text{ m}$ a tloušťce 35 mm. Potrubí ústí do komory, kde jsou umístěny kulové uzávěry o světlosti 2,5 m a přes ně teče voda na dvě plně automatizované soustrojí s FT. Voda po odevzdání energie turbínám, je odváděna 3,6 km dlouhým podzemním tunelem širokým 8,4 m a vysokým 7,8 m do vyrovnávací nádrže Lipno II ve Vyšším Brodě. [40]

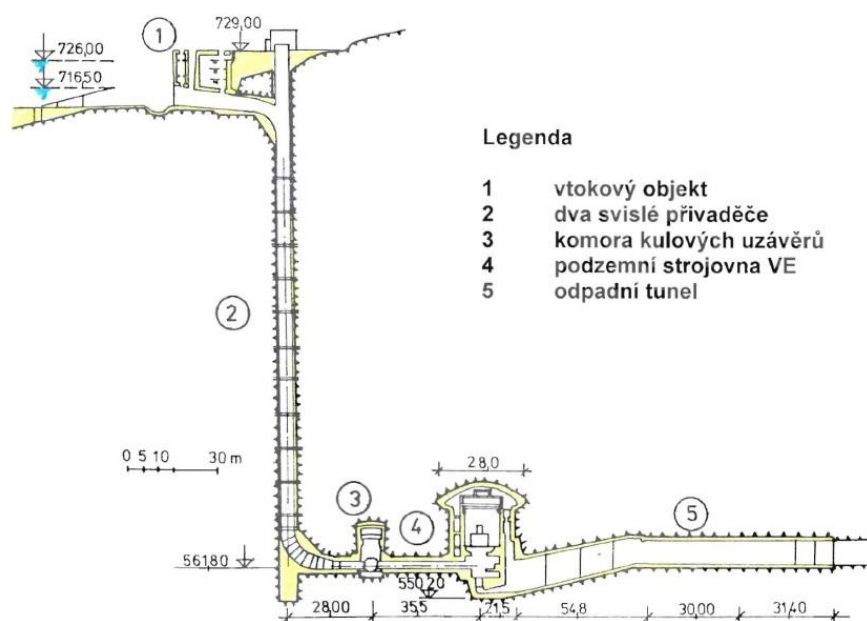
K dopravě technologického zařízení a personálu do podzemí slouží šikmý tunel se sklonem 45° , široký 6,8 m, vysoký 9,7 m a dlouhý 200 metrů. [44]

Elektrická energie z generátorů o velikosti 15 kV se vyvádí tunelem pomocí kabelů do nadzemních transformátorů a rozvodny 110 kV. V nadzemním areálu je též umístěna rozvodna 22 kV, která zásobuje rozsáhlé okolí elektrickou energií. [44]



1. Hráz Lipenské přehrady pohled od rozvodny 110 KV.
2. Tunel šikmého nákladního výtahu.
3. Komora kulových uzávěru.
4. Podzemní kaverna – hydrocentrály.
5. Čelní stěna podzemní kaverny, skalní masiv.
6. Podzemní hala elektrárny dva generátory o výkonu $2 \times 60 \text{ MW}$.

Obr. 2.5: Sensitivní mapa VE Lipno I – dispoziční uspořádání [40]



Obr. 2.6: Řez podzemí VE Lipno I [11]

2.4.1 HISTORIE VE LIPNO I

Studie a projekt přehrady s elektrárnou na Lipně s vznikly po druhé světové válce. Výstavba začala v roce 1950 a trvala až do roku 1959. [40] [44]

1950 a 1951 – Zahájeny první pozemní práce. První geologické průzkumy. Přeložky silnic, odlesňování, likvidace starých domů a osad, stavba příjezdových cest ke staveništi, stavba zázemí pro dělníky, zahájena stavba betonárky (v té době jedna z nejmodernějších v Evropě).[49]

1952 – Začala stavba přehradní hráze. [40]

1954 – Výlom první šachty, zahájena ražba štoly v podzemí a betonování výpustí gravitačního bloku hráze.[40]

1955 – Převedení Vltavy do nového koryta. [49]

1956 – Dokončen výlom komory kulových uzávěrů v podzemí a započata stavba nadzemní rozvodny 110 kV. [40]

1957 – Zahájen výlom jádra v podzemí hydrocentrály, po jehož dokončení přišla na řadu betonáž. [49]

1958 – Montáž prvního soustrojí TG2. Spirála, která je tvořena čtyřmi díly, byla postupně spuštěna výtahem v šikmém tunelu, kde byla následně svařena v jeden celek. Generátor byl taktéž spuštěn po částech a následně zkompleťován. Částečné napouštění jezera. [40] [49]

1959 – Dokončená montáž technologií, zkoušky a první měření na díle. **15. července 1959** v 17:55 první zkouška TG2 a plné uvedení do provozu 13. srpna 1959. TG1 byla zpuštěna **7. prosince 1959** a plně uvedena do provozu 5. ledna 1960. Dokončovací práce. [40] [44] [49]

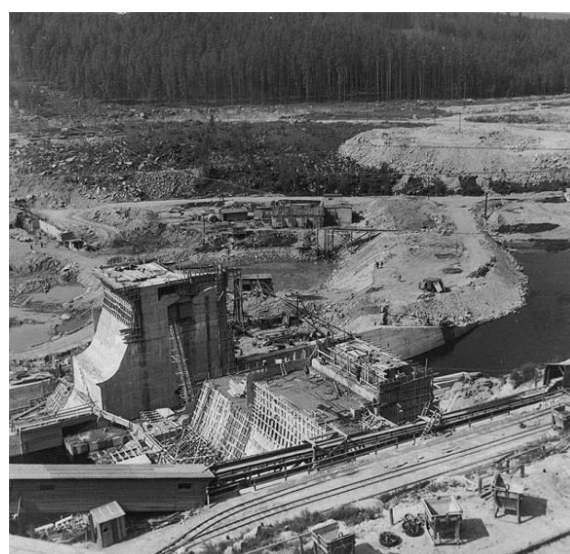
1987 – Výměna oběžného kola (původní OK vyrobilo za 28 let provozu 2 300 000 000 kWh)

2012 - 5. Listopadu začala nejrozsáhlejší rekonstrukce (TG2) v historii. Celkové investice nepřesáhnou částku 200 milionů korun. Zhotoviteli jsou pro strojní část konsorcium ČKD Blansko Engineering a ČKD Blansko strojírna (výměna nově navrženého oběžného kola, rozváděcích lopat s novým hydraulickým tvarem, spirály, horního a dolního lopatkového kruhu, atd.), generátor 1. Servis Energo (oprava stávajícího rotoru a dodávka nového stator) a Andritz Hydro (elektropráce a dodání nového řídicího systém).[37] [44]

2014 - Dokončena modernizace TG2, která přinesla navýšení účinnosti o cca 5 % a měla by zvýšit roční výroby elektřiny o 4 miliony kWh.



Obr. 2.7: Propagační plakát z doby budování VE Lipno I



Obr. 2.8: Betonáž gravitačních bloků a příprava podloží pro sypání zemní hráze 1956 [49]



Obr. 2.9: Pohled na původní VT v roce 2012 [40]



Obr. 2.10: Pohled na spirální skříň v roce 2014 [23]

2.4.2 PROBLEMATIKA VE LIPNO I

Obě spirály TG1 a TG2 byly uvedeny do provozu s nepřipustnými vadami v roce 1959 a jejich zprovoznění bylo podmíněno provedením rozsáhlých výpočtů a měření, které probíhaly od roku 1959 až do roku 2012 (v roce 1956 proběhlo tensometrování zkušební spirály). Konstrukce spirály byla dle výpočtu [29] nadimenzována na max. provozní tlak 2,1 MPa a zkušební tlak 3,2 MPa. Při tlakové zkoušce spirály TG2 [15] v roce 1958 došlo k prasknutí sváru již při 2,55 MPa (původní zkušební tlak byl snížen a měl dosáhnout 2,8 MPa). Při opakované tlakové zkoušce došlo dle zprávy [15] k trvalým deformacím spirály v místech, kde byla překročena mez kluzu. Na základě těchto poznatků měly být v kritických místech před uvedením do provozu navařeny plechové zpevňující výztuhy, což se ale nerealizovalo. Na základě měření a poznatků na TG2 byl dle zprávy [16] ocelolitinový kruh s výztužnými lopatami stažen a vyztužen, tak aby se zabránilo jeho deformacím. Hodnota bezpečnosti materiálu spirál se pohybuje na hodnotě 1,04 až 1,3 dle použité hodnoty meze kluzu. Spirální skříně byly převzaty do plného provozu až po smírčím řízení na Ministerstvu paliv a energetiky v roce 1960, jehož výsledkem bylo ale pouze prodloužení záruky o 6 měsíců. Závady, na které bylo upozorněno (vady ve svárech poddimenzovaná konstrukce apod.), ale odstraněny nebyly a zůstaly tam dodnes. Špatné vlastnosti spirálních skříní jsou dány zejména nevhodně použitým materiálem 10 373.1 a 10 374.1, který není určený na svařované konstrukce z ocelí. Z těchto poznatků vyplívají nejružnější rizika a to zejména tyto. [15] [16] [24] [30]

Vady zjištěné radiografickými kontrolami (RTG) ve svarových spojích mezi ocelolitinovou částí lopatkových kruhů spirály a jednotlivé segmenty, dále pak obvodové svary mezi jednotlivými segmenty spirály. Tyto zjištěné vady vznikly již při svařování ve výrobě a na stavbě. [30]

Vyčerpání únavové živostnosti. Je celkem problematické určit životnost, vzhledem k tomu, že se použitý materiál už nevyrábí a není možné získat křivky porušení. Pokud by se životnost počítala při zohlednění nejnižší používané bezpečnosti 30% je pravděpodobná hodnota celkové životnosti $N = 33\,000$ cyklů. Tento stav by měl nastat v roce 2012. [30]

Vzniku křehkého lomu při rozvoji trhliny. Při teplotách pod +5 °C, která se vyskytuje na VD Lipno cca 4 měsíce je možnost vzniku křehkého lomu. [30]

Zeslabení stěny důlkovou korozí a vnitřními vadami. Beton je již od pláště odtržený a zkondenzovaná voda stéká mezi beton a ocelový plášť, kde způsobuje důlkovou korozi. [30]

Zjištění zdvojení materiálu velkého rozsahu u použitých plechů. Vady plechů již od výroby. Tyto vady přímo nesnižují celkovou pevnost použitých plechů, ale jsou potenciálním místem iniciace a rozvoje trhliny na okrajových místech těchto vad zvláště v místech přechodu do svarových spojů. [30]

2.4.3 HISTORIE MĚŘENÍ NA TG1 A TG2

Během historie bylo na spirálních skříních několikrát provedeno tenzometrické měření napětí (seznam měření s výpisem nejdůležitějších jevů je uveden níže). Defekty ve svarových spojích jsou pravidelně kontrolovány radiografickými kontrolami (RTG) ve dvouletých intervalech. Kromě těchto měření byla také provedena kontrola tloušťky stěn plechů a měření tvrdosti (výsledky z měření RTG, tloušťky a tvrdosti nebudou ve zprávě uváděny). [24]

1956 ČKD Blansko 4-VUY-2412 Tensometrování zkušební spirály Lipno

Účelem měření bylo zjistit namáhání materiálu v určitých místech zkušební spirály pomocí tenzometrů a tak ověřit teoretické výpočty pro skutečné provedení, které jsou uvedeny ve zprávě 4-VTU9901-08. Výsledky neodpovídaly skutečnosti a bylo rozhodnuto, že je nelze pokládat za směrodatné a měření se opakovalo ještě jednou. Maximální napětí, které se naměřilo bylo cca 117 MPa při zkušebním tlaku 2 MPa. [14]

1958 ČKD Blansko 4-VUY-3315 Tensometrování spirály pro TG 2 hc. Lipno

Měření bylo provedeno za účelem zjištění namáhání materiálu v předpokládaných nebezpečných bodech spirály při prováděné tlakové zkoušce, která se prováděla ve výrobním závodě. Celkem byly provedeny 2 zkoušky. První zkouška nebyla dokončena z důvodu prasknutí těsnícího sváru spirály při tlaku 2,55 MPa. Původní zkušební tlak 3,2 MPa, byl snížen na 2,8 MPa. Při druhé tlakové zkoušce se podařilo dosáhnout zkušebního tlaku 2,9 MPa, kde výdrž byla 25 minut. Odečet tenzometrů probíhal při najetí na požadovaný tlak a po 25 minutách. Hodnoty napětí byly rozdílné a po snížení tlaku na 0 MPa se hodnoty některých tenzometrů nevrátili do výchozí polohy. Měření bylo pro kontrolu opakováno, ale při najetí na 2,9 MPa prasklo gumové těsnění příruby. Během měření byla překročena mez kluzu. Spirála doznala tvarových změn, změnila svůj tvar a přešla v důsledku porušení stability do nové rovnovážné polohy a to z výchozího kruhu do oválu. [15]

1959 ČKD Blansko 4-VUY-3400 Tensometrování spirály pro TG I hc. Lipno

Měření bylo provedeno za účelem zjištění skutečného namáhání materiálu v předpokládaných nebezpečných místech spirály při prováděné tlakové zkoušce. Dále bylo provedeno za účelem ověření naměřených hodnot na spirále TG II. Zkouška probíhala ve výrobním závodě. Měření bylo prováděno dvakrát. Poprvé od tlaku 0 do 2,2 MPa, zkouška byla přerušena z důvodu prosakování vody přes těsnění. Při druhé tlakové zkoušce bylo těsnění opraveno a tlak byl zvyšován od 0 do 2,8 MPa. Tlak byl udržován po dobu asi 25 minut a pak byl snižován až na 0 MPa. Oproti tlakové zkoušce na TG II byl ocelolitinový kruh s výztužnými lopatami stažen a vyztužen tak, aby se zabránilo jeho deformacím, které vznikly při tlakové zkoušce na TG II. U prvního měření už při tlaku 1,9 MPa byl tlak větší než je R_e . Při snižování tlaku na 0 MPa zůstala na tenzometrech výchylka. Při druhé tlakové zkoušce byly naměřeny u všech tenzometrů nižší hodnoty napětí. Při měření byly zjištěné lokální místa, kde napětí přesahovalo R_e (v místech uchycení stěny spirály k lopatkovému kruhu).[16]

1959 ZVIL Plzeň SV 3075-1959- Namáhání spirální skříně TG 2 Lipno
LZP-VZÚ-VS

Zpráva popisuje statické měření namáhání svařované spirální skříně provedené při jejím napouštění vodou a měření dynamického namáhání při vypínacích zkouškách turbosoustrojí. Měření bylo prováděno na požádání výrobce skříně ČKD Blansko a mělo za účel ověřit výsledky z měření při talkové zkoušce. Odporové tenzometry byla nalepeny na místa, kde se předpokládal vznik největšího napětí. V závěru zprávy je konstatováno, že výsledky statického i dynamického měření ukazují, že největší naměřené napětí nedosahuje meze pružnosti použitého materiálu, takže konstrukci skříně lze považovat za vyhovující. Maximální naměřená hodnota napětí bylo 235 MPa. [19]

1959 ČKD Blansko 4-VUY-3670 Tensometrování spirály pro TG I hc. Lipno
při uvádění do provozu

Zpráva zahrnuje výsledky měření na díle při napouštění spirály na provozní tlak před uvedením soustrojí do provozu. Měření bylo provedeno za účelem ověření hodnot deformací a napětí v nebezpečných místech spirály, které byly zjištěny při tlakové zkoušce. Naměřené hodnoty se shodují s hodnotami, které byly měřeny při tlakové zkoušce. Maximální napětí bylo 255 MPa při tlaku 1,6 MPa. Dá se předpokládat, že vyztužení spirály mělo pozitivní vliv na tuhost a tudíž nenastalo zvýšení napětí, jako se to stalo u měření spirály TG II. [17]

1963 ČKD Blansko 4-VUY-4721 Kontrola napjatosti u spirál TG I a TG 2 VE
Lipno I

Zpráva obsahuje výsledky kontrolních měření na spirálách turbin TG I a TG II a porovnání s výsledky měření, které byly prováděny na stejných spirálách při prvním napouštění (při uvádění soustrojí do chodu). Měření bylo prováděno při tlaku 1,53 MPa a výsledky jsou totožné s výsledky z roku 1959. Maximální napětí u TG I bylo 255 MPa a u TG II 230 MPa. [18]

1988 Škoda Plzeň VÚET 7709 Namáhání spirální skříně turbíny generátoru
2 Lipno

Měření navazuje a je porovnatelné s měřením z roku 1959, kdy bylo měřeno soustrojí TG II při uvádění do provozu. Bylo měřeno statické namáhání skříně tlakem od sloupce vody při otevření KU tlak 1,6 MPa a dynamické účinky různých stavů soustrojí. Měřené napětí nevykazuje změny oproti měření z roku 1959. Maximální naměřená hodnota napětí byla 237 MPa. [20]

- 1990** SVÚSS SVÚSS 90-02004 Pevnostní posouzení spirálních skříní Turbin
Běchovice TG1 a TG2 hydrocentrály Lipno na základě
tenzometrického měření

Zpráva obsahuje provozní měření napjatosti na spirálách TG I a TG II. Měření vychází ze teoretického rozboru napjatosti a navazuje na měření z roku 1959 a 1989. Na základě vyhodnocení napjatosti je proveden odhad zbytkové životnosti spirálních skříní. Bylo provedeno měření při statické a dynamické namáhání. U dynamického měření byly měřeny tyto stavy: rozběh turbíny, běh turbíny, odstavení turbíny a vypínací zkoušky TG. Největší napětí při statické zkoušce bylo měřeno na TG I při otevření KU a činilo 306 MPa a největší napětí při dynamické zkoušce činilo 320 MPa. Hodnoty, které byly naměřeny jsou největší v historii měření. [21]

- 2012** ÚAM Brno ZP5274 Tenzometrické měření spirální skříně TG2
hydrocentrály VE Lipno I

Ve zprávě jsou obsaženy výsledky z posledního měření na TG2 před GO. Měření bylo prováděno při určitých provozních stavech (njetí, chod, odstavení a poruchové odstavení). Měření nebylo prováděno za účelem porovnání dřívějších měření ani na zjištění maximálních napětí, ale k získání podkladů pro výpočtáře, kteří výsledky použili při posouzení spirály TG1. (kalibrace výpočtu životnosti v programu ANSYS). [22]

- 2014** ÚAM Brno ZP5446 Dopsat až se to bude měřit

Zpráva obsahuje výsledky měření napjatosti spirály TG2 po GO a porovnání s výsledky měření před GO. Dále pak porovnání z měřením, které probíhalo při tlakové zkoušce a porovnání s pevnostním výpočtem spirály. Měření bylo prováděno při různých provozních stavech soustrojí (njetí, provoz, provozní odstavení, simulace havarijního odstavení, otevření a zavření KU). Maximální naměřené napětí v místě, kde se předpokládá výskyt největšího napětí byl 122 MPa při tlaku 1,93 MPa. [23]

3 ZÁKLADY MECHANIKY

Pokud chceme provozovat stroje a jejich součásti bezpečně, spolehlivě a bezporuchově, musíme při projektování a konstruování vycházet ze základů mechaniky. I v případě, že dojde k poruše nebo havárii stroje či části stroje, vychází se při zjišťování a následné opravě ze základů mechaniky. Z toho plyne, že pokud neznáme a nejsme schopni aplikovat základní mechanické zákony a pojmy na složité mechanické celky, není možné tyto celky projektovat, konstruovat, počítat i experimentálně ověřovat.

V této kapitole budou postupně popsány a vysvětleny vybrané základní pojmy a principy mechaniky poddajných těles. Obsah kapitoly byl volen zejména tak, aby postihl pojmy, ze kterých vychází nebo se kterými přímo pracuje experimentální mechanika. Mezi vybrané kapitoly patří takové, které se řadí do skupiny pružnosti a pevnosti, jako jsou deformace a napjatost tělesa, pevnost, bezpečnost, životnost. Poslední kapitola materiálové charakteristiky patří do skupiny nauky o materiálech.

Pojmy a principy jsou popsány tak, aby velice jednoduše, ale zároveň nejvýstižněji dokázaly popsat zmíněnou problematiku. Rozšíření zde popsaných pojmů a principů lze najít v odborné literatuře, viz použité informační zdroje [1] [2] [3] [4] [6].

3.1 DEFORMACE TĚLESA

Je určená deformací každého trojnásobně elementárního prvku (elementu tělesa). Deformací je zde přitom míněna změna rozměrů a tvaru elementu. Změna elementů je popsána délkovými přetvořeními ε_x , ε_y , ε_z a úhlovým přetvořením γ_{xy} , γ_{yz} , γ_{zx} , z čehož plyne, že deformace je určena tenzorem přetvoření T_ε . [2]

$$T_\varepsilon = \begin{pmatrix} \varepsilon_x & \frac{\gamma_{xy}}{2} & \frac{\gamma_{xz}}{2} \\ \frac{\gamma_{xy}}{2} & \varepsilon_y & \frac{\gamma_{yz}}{2} \\ \frac{\gamma_{xz}}{2} & \frac{\gamma_{yz}}{2} & \varepsilon_z \end{pmatrix} \quad 3.1$$

3.2 NAPJATOST TĚLESA

Je množina napjatostí ve všech bodech tělesa. Je určena tenzorovým polem a závisí na tvaru, zatížení a vlastnostech materiálu tělesa. Napjatost je popsána normálovým napětím σ a smykovým napětím τ a z toho vyplývající tenzor napětí τ_σ . Tenzor napětí τ_σ popisuje napjatost v okolí obecného bodu tělesa. Pro složky σ a τ platí znaménková konvence a to: $\sigma > 0$ – napětí tahové, $\sigma < 0$ – napětí tlakové, τ má smluvní charakter ve vazbě na použitý souřadnicový systém. [1] [2]

$$T_\sigma = \begin{pmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{xy} & \sigma_y & \tau_{zy} \\ \tau_{xz} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{pmatrix} \quad 3.2$$

3.2.1 HLAVNÍ ROVINA, HLAVNÍ PŘETVOŘENÍ, HLAVNÍ NAPĚTÍ, HLAVNÍ SMĚRY

Hlavní rovina je taková rovina, kde nepůsobí smykové napětí. Příslušné normálové napětí se nazývá hlavním napětím a odpovídající směr hlavním směrem. Hlavní napětí (normálové) je kolmé k hlavní rovině. Každá obecná napjatost má tři hlavní – navzájem

kolmé – roviny a tři hlavní napětí $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$. σ_1 maximální hlavní napětí, σ_2 střední hlavní napětí a σ_3 minimální hlavní napětí. Pro hlavní napětí musí platit vztah 3.3. Potom má tenzor napětí tvar, který je uveden ve vztahu 3.4.

$$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3 \quad 3.3$$

$$T_\sigma = \begin{pmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{pmatrix} \quad 3.4$$

Podle počtu nenulových napětí v tenzoru napětí rozdělujeme napjatost na tři základní typy: jednoosou, dvouosou a trojosou.

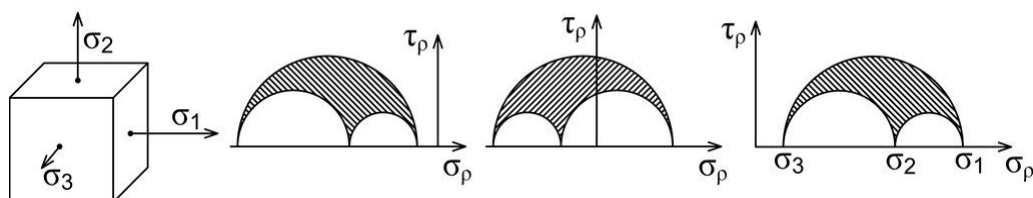
Analogicky k napětí platí teorie i pro přetvoření. Z toho plyne, že značení hlavních přetvoření ($\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$) je stejné jako značení hlavních napětí a musí tedy platit. ε_1 maximální hlavní napětí, ε_2 střední hlavní napětí a ε_3 minimální hlavní napětí.

$$\varepsilon_1 \geq \varepsilon_2 \geq \varepsilon_3 \quad 3.5$$

$$T_\varepsilon = \begin{pmatrix} \varepsilon_1 & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_2 & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_3 \end{pmatrix} \quad 3.6$$

[1] [2] [3]

Napjatost je geometricky určena Mohrovou kružnicí, viz kapitola 3.2.3



Obr. 3.1: Grafické znázornění obecné napjatosti

3.2.2 DVOJOSÁ (ROVINNÁ) NAPJATOST (PŘETVOŘENÍ)

Stav, kdy jsou nenulová dvě normálová napětí (přetvoření) a jedno normálové napětí (přetvoření) je nulové. Pro dvojosou napjatost (přetvoření) platí $\sigma_1 = \sigma_x$ a $\sigma_2 = \sigma_y$, ($\varepsilon_1 = \varepsilon_x$ a $\varepsilon_2 = \varepsilon_y$). Tenzor napětí (přetvoření) má v tom případě tvar, který je uveden ve vztahu 3.7 (3.8).

$$T_\sigma = \begin{pmatrix} \sigma_x & 0 \\ 0 & \sigma_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma_1 & 0 \\ 0 & \sigma_2 \end{pmatrix} \quad 3.7$$

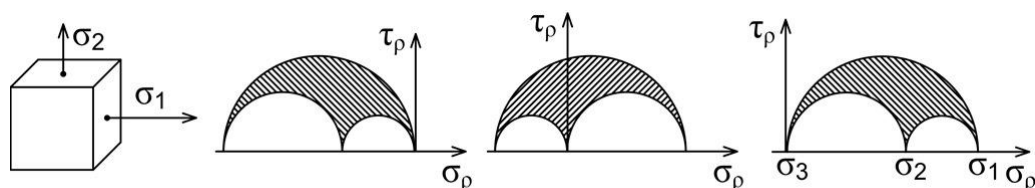
$$T_\varepsilon = \begin{pmatrix} \varepsilon_x & 0 \\ 0 & \varepsilon_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \varepsilon_1 & 0 \\ 0 & \varepsilon_2 \end{pmatrix} \quad 3.8$$

Stav dvojosé napjatosti (deformace) definované smykovým napětím (skosem) spolu s dvěma normálovými napětími (přetvořeními) ležící v téže rovině.

$$T_{\sigma} = \begin{pmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} \\ \tau_{xy} & \sigma_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma_1 & \tau_{xy} \\ \tau_{xy} & \sigma_2 \end{pmatrix} \quad 3.9$$

$$T_{\varepsilon} = \begin{pmatrix} \varepsilon_x & \frac{\gamma_{xy}}{2} \\ \frac{\gamma_{xy}}{2} & \varepsilon_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \varepsilon_1 & \frac{\gamma_{xy}}{2} \\ \frac{\gamma_{xy}}{2} & \varepsilon_2 \end{pmatrix} \quad 3.10$$

[1] [2] [3]



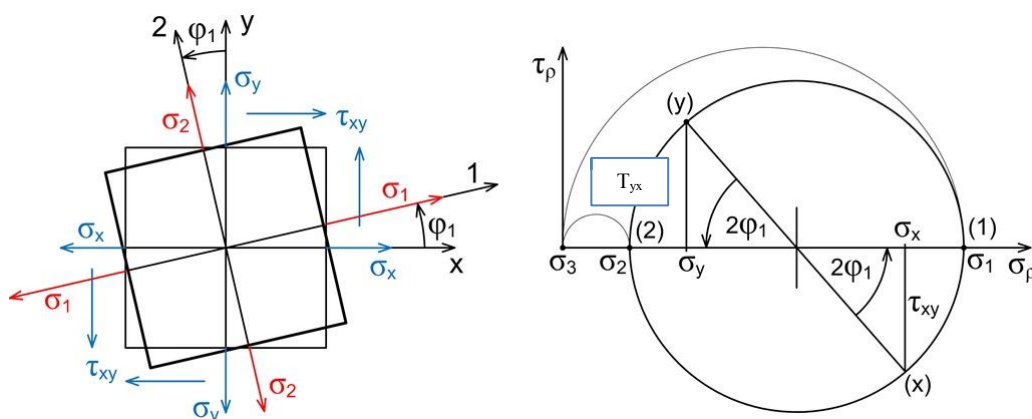
Obr. 3.2: Grafické znázornění dvojosé napjatosti

3.2.3 MOHROVA KRUŽNICE PRO ROVINOU NAPJATOST

Je graf, znázorňující stav napjatosti určitého bodu v rovině. Na ose x se vynášší σ a na osu y τ . Konstrukce umožňuje rychlé grafické odhady hodnot. Pomocí Mohrovy kružnice lze stanovit velikosti hlavních normálních napětí $\sigma_1 = \sigma_{\max}$ a $\sigma_2 = \sigma_{\min}$ a polohy hlavních rovin, kde jsou smyková napětí rovna nule, a nebo když známe hlavní napětí, tak stanovit složky napětí σ_x , σ_y a smykové napětí τ_{xy} , respektive τ_{yx} . [1] [51]

$$\sigma_{1,2} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad 3.11$$

$$\operatorname{tg} 2\varphi_1 = \left| \frac{2 \cdot \tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y} \right| \quad 3.12$$



Obr. 3.3: Grafická konstrukce Mohrovy kružnice [2]

Poznámka: Jak už bylo řečeno, Mohrova kružnice se dá dle analogie použít i pro stanovení hlavních přetvoření $\varepsilon_1 = \varepsilon_{\max}$ a $\varepsilon_2 = \varepsilon_{\min}$. Potom na ose x je ε a na ose y γ .

Poznámka: Značení napětí (přetvoření) neodpovídá značení, které je použito v kapitole 3.2.1. Pokud by se používalo značení dle zmíněné kapitoly, bylo by $\sigma_{\max} = \sigma_3$. Dále se budou značit hlavní napětí $\sigma_1 = \sigma_{\max}$ a $\sigma_2 = \sigma_{\min}$.

3.3 PEVNOST, REDUKOVANÉ NAPĚTÍ, BEZPEČNOST

Pro posouzení pevnosti při víceosé napjatosti je nutné mít kritérium pro srovnání jednoosé a víceosé napjatosti. Tato kritéria poskytují teorie pevnosti - hypotézy. V praxi se používá několik hypotéz (Gusetova, HMM, Mohrova). My zvolíme a popíšeme pouze HMM, která se nejvíce hodí pro hodnoty napětí na spirální skřini.

HYPOTÉZA HMM (HUBER, VON MISES, HENCKY), ENERGETICKÁ

Dle této hypotézy rozhoduje o stavu napjatosti měrná energie napjatosti (hustota deformační energie) na změnu tvaru.

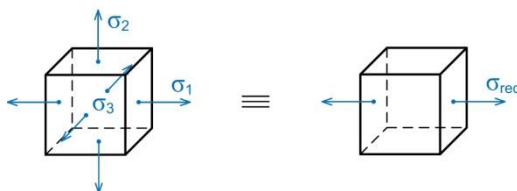
Vztah pro trojosou napjatost:

$$\sigma_{red} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1\sigma_2\sigma_3} \quad 3.13$$

Vztah pro rovinou napjatost:

$$\sigma_{red} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1\sigma_2} \quad 3.14$$

Redukované napětí σ_{red} je hodnota napětí fiktivní tahové napjatosti, která je přiřazena k napjatosti prostorové a to tak, že prostá bezpečnost je vzhledem k mezi kluzu σ_k stejná pro prostorovou i pro fiktivní tahovou napjatost.



Obr. 3.4: Grafické znázornění trojosé napjatosti a redukovaného napětí

Tuto náhradu je možné uplatnit pouze pro stanovení prosté bezpečnosti, nikoliv pro jiné výpočty, např. deformace tělesa.

Pro praktické výpočty a posouzení prosté bezpečnosti vzhledem k meznímu stavu pružnosti při obecné napjatosti se používá koeficient bezpečnosti k_k .

$$k_k = \frac{\sigma_k}{\sigma_{red}} \quad 3.15$$

$k_k > 1$ – vyhovuje

$k_k < 1$ – nevyhovuje

Poznámka: k_k se obvykle volí 1,5÷3. [1] [2]

3.4 ZATÍŽENÍ TĚLESA, MEZNÍ STAVY TĚLESA, ŽIVOTNOST

Zatížení tělesa je způsobeno interakcí tělesa s okolím nebo vnitřními procesy, které v tělese probíhají. Výsledkem je vznik napjatosti a deformace s možností vzniku porušení celistvosti tělesa. V našem případě je spirála zatížena tlakem vody uvnitř spirály.

Mezním stavem rozumíme stav, kdy se mění charakteristická vlastnost tělesa.

a) Mezní stav deformace

Je takový MS, po jehož překročení ztrácí součástka svoji funkční způsobilost.

V našem případě stav nastal při tlakové zkoušce spirály TG2, kdy došlo k prasknutí svaru.

b) Mezní stav pružnosti

S tělesem provedeme zátěžový cyklus, spočívající v zatížení a následném odtížení.

Po překročení MS pružnosti zůstávají v tělese trvalé (plastické) deformace.

MS pružnosti nastal u obou spirál. Došlo k lokálnímu překročení R_e . Po zatížení a následném odtížení se nevrátily tenzometry zpátky na výchozí hodnotu.

c) Mezní stav deformační stability

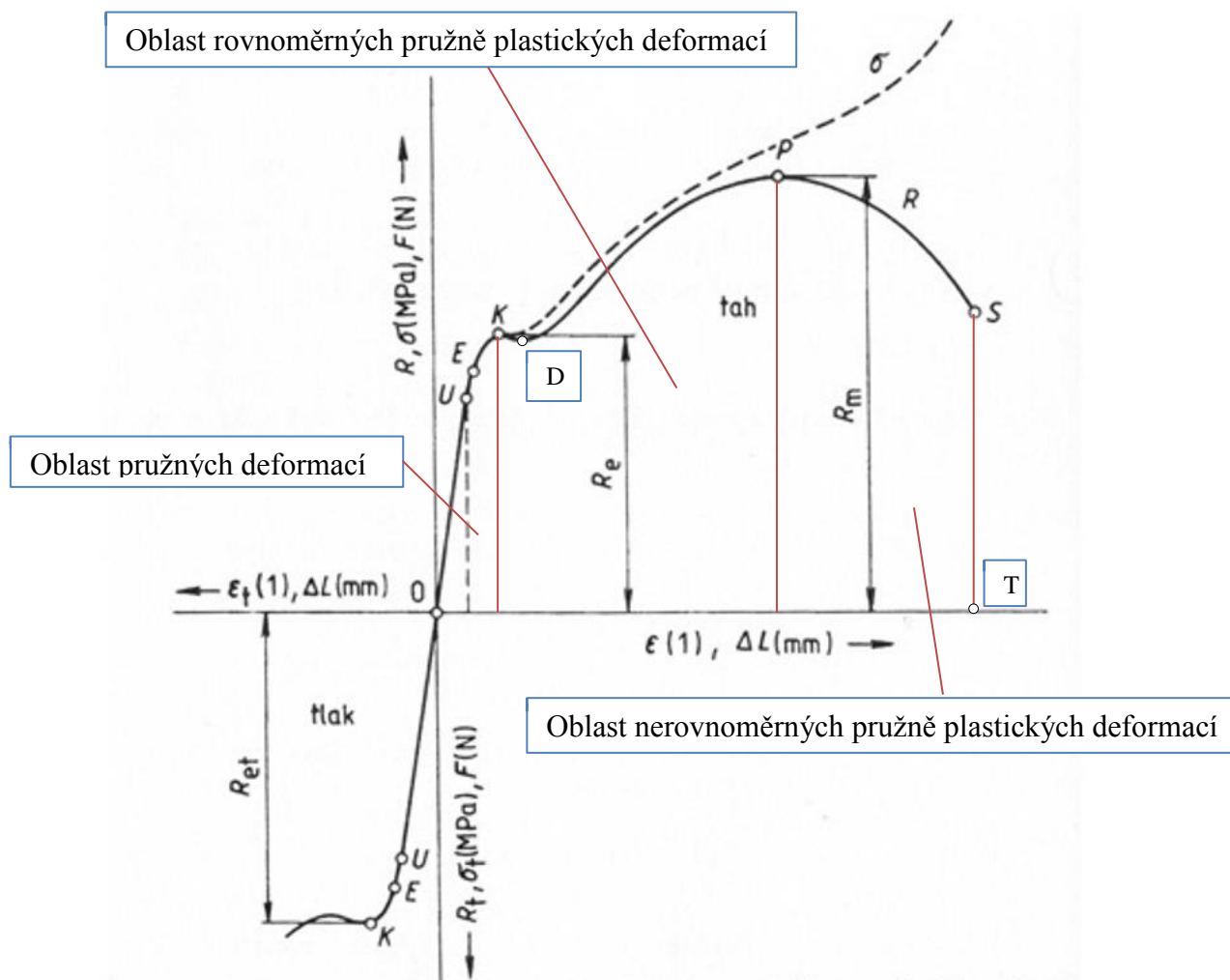
Stabilní geometrická konfigurace tohoto stavu se stává labilní a jiná geometrická konfigurace se stává stabilní (při stejném způsobu namáhání).

U spirály TG2 došlo ke změně tvaru, z kruhu se stal ovál.

Životností se rozumí doba (počet zatěžovacích cyklů) do vzniku mezního stavu. Většinou se značí N (počet cyklů), pro náš případ počet najetí – odstavení soustrojí. Ačkoliv velká část lipenské problematiky pojednává o životnosti, nebudeme se v této práci z důvodů rozsáhlosti problematiky dále životností zabývat. (Ve zprávě není prostor a ani není určená na řešení problematiky životnosti). [1] [2]

3.5 MATERIÁLOVÉ CHARAKTERISTIKY

Závislost mezi napjatostí a deformací popisují konstitutivní vztahy materiálu. Ty lze stanovit pouze experimentálně na základě vhodně uspořádaných zkoušek. Získané silově deformační charakteristiky se převedou na obecnější napjatostně – deformační charakteristiky, na základě kterých se formulují potřebné konstitutivní vztahy. Základním experimentem je tahová a tlaková zkouška. [1] [2] [6]



Obr. 3.5: Průběh tahového (tlakového) diagramu u oceli [50]

O – nezatížený stav

U - hranice lineární závislosti

E – hranice pružného chování

K – horní mez kluzu

D – dolní mez kluzu

P – maximální zatížení

S – počátek lomu

T – úplné porušení celistvosti

3.5.1 OBLAST PRUŽNÝCH DEFORMACÍ

Platí zde jednoduchá lineární závislost (Hookeův zákon). Mechanické chování izotropního materiálu je popsáno dvěma nezávislými konstantami, jmenovitě modulem pružnosti v tahu E a Poissonovým číslem (součinitel příčné deformace) μ .

$$E = (1,9 \text{ až } 2,4) \cdot 10^5 \text{ MPa a } \mu = 0,3 \text{ (pro ocel)}$$

Hookeův zákon

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad 3.16$$

Oblast pružných deformací je ohraničena mezí kluzu, která může být určena několika způsoby s odpovídajícím označením. Pro naši problematiku jsou důležité zejména dvě významové meze kluzu (významově i značením).

Mez kluzu konkrétního materiálu, získanou konkrétní zkouškou s označením R_e .

Mez kluzu modelovou, kterou používáme při výpočtovém řešení a posouzení a kterou určíme na základě posouzení chování materiálu v širších souvislostech. Značíme σ_k .

Z hlediska měření (tenzometrie) je tato oblast nejdůležitější a jediná, která se vyskytla během měření na VE Lipno.

[1] [2] [6]

3.5.2 OBLAST ROVNOMĚRNÝCH PRUŽNĚ PLASTICKÝCH DEFORMACÍ

Oblast začíná v bodě K a končí v bodě P, kde zatěžovací síla dosahuje své maximální hodnoty. Deformace v této oblasti závisí na historii zatěžování. Charakteristikou tohoto mezního stavu je tzv. **smluvní mez pevnosti** R_m , která vystihuje přechod od stabilních deformací k nestabilním. [1] [6]

Z hlediska měření a vyhodnocení je oblast problematická. Tenzometry v této oblasti prakticky měří, ale výpočet přetvoření na napjatost je složitý a toto lze provést pouze na základě výsledků tahové zkoušky. Vzhledem k tomu, že velké plastické deformace lze u strojních dílů jen těžko dopustit, vyskytuje se oblast ve strojírenské praxi velice omezeně a téměř výhradně nabývá lokálních hodnot. Výjimku tvoří destrukční zkoušky, kde se přes tuto oblast přejíždí až k totální deformaci.

3.5.3 OBLAST NEROVNOMĚRNÝCH PRUŽNĚ PLASTICKÝCH DEFORMACÍ

Dochází k lokální koncentraci plastické deformace a vzniká zúžení-krček. Oblast končí přetržením tyče, tedy dosažením mezního stavu lomu. O tom, kdy porušování začíná a jak až do lomu probíhá, nedává běžná tahová zkouška žádné údaje. [1] [2]

Vzhledem k měření stav nastává pouze při destrukčních zkouškách. Ve třetí oblasti se hodnoty z tenzometrů téměř nevyhodnocují. Zajímavý je pouze stav, který nastane v bodě S a T.

4 MĚŘENÍ A VYHODNOCENÍ

Ačkoliv se v dnešní moderní době čím dál více ustupuje od měření a experimentálního výzkumu a tento vědní obor je nahrazován numerickými výpočty a simulacemi prováděných na moderních extrémně výkonných počítačích, má měření stále nezastupitelnou roli v řadě průmyslových a společenských odvětví. V řadě specifických oborů je měření stále nezastupitelné, jako např. modelové zkoušky turbín a hydrotechnických zařízení. Žádný výpočet, ať je sebelepší nedokáže, plně nahradit experimentální ověření.

Každé měření by mělo mít svoji „štábní kulturu“, řád a strukturu. Přece jenom řada měření je naprosto unikátních a jejich opakování, pokud je to vůbec možné, stojí nemalé finanční a časové náklady. Často jsou na výsledcích měření založena velmi důležitá rozhodnutí, která mívají velký dopad na společnost (odstavení bloku jaderné elektrárny, vyřazení z provozu stroje, vyhlášení mimořádné situace, apod.).

Z každého měření by měly být záznamy. Záznamy se dělí na dvě základní skupiny, a to na záznamy digitální a analogové. Do digitálních záznamů můžeme řadit naměřená data, naskenované poznámky, digitální zprávy atd. Do analogových záznamů řadíme ručně psané poznámky, tištěné zprávy apod. Všechny záznamy by měly podléhat určitým pravidlům, a to zejména sběru, přístupu, uložení a skartaci. Všechny záznamy musí být čitelné v listinné i digitální formě, a to i několik desetiletí.

Ke každému měření by se mělo přistupovat tak, jako by bylo ojedinělé, výjimečné a neopakovatelné. Všechna měření se skládají z několika zásadních fází. Podle druhu měření mohou být některé fáze rozděleny a více specifikované, anebo spojeny, ba přímo vynechány. Mezi základní fáze měření patří přípravná fáze, fáze měření a fáze vyhodnocení.

V úvodních dvou kapitolách budou stručně popsány vybrané základní pojmy, které se přímo, anebo nepřímo podílejí nebo vstupují do měření a vyhodnocení. Vzhledem k rozsáhlosti a rozmanitosti pojmů a různých podkapitol, které je možné sem zařadit, musely být vybrány jenom některé, a to takové, které jsem považoval za nejdůležitější. Zcela jsou vynechány pojmy z oblasti jakosti, statistického vyhodnocení měření, základy metrologie (jednotky, termíny), kalibrace, ale i jiné další. Všechny vynechané pojmy jsou popsány v odborné literatuře, zejména pak v [5] [8] [10] [32]. V poslední podkapitole je pak rozebrán měřicí systém, který se využíval při měření na VE Lipno I.

4.1 EXPERIMENT A MĚŘENÍ

4.1.1 EXPERIMENT

Je praktická činnost, cílevědomě navozený proces, který je bezprostředně usměrněn na poznání skutečnosti. S pojmem experiment se setkáváme v oblasti vědy, techniky, ale i v běžném životě. Experimenty se dělí dle různých hledisek, a to zejména takto:

- a) Typ experimentu (reálný, myšlenkový, počítačový)
- b) Obor, kde se experiment realizuje (technický, biologický, ekonomický)
- c) Místo realizace experimentu (laboratorní, provozní, přírodní)
- d) Řízení experimentu (aktivní, simulační, plánovaný, interaktivní)
- e) Cíle experimentu (vědecký, praktický)

[10]

4.1.2 MĚŘENÍ

Je souhrn experimentálních operací a jeho cílem je stanovení hodnoty měřené veličiny ve zvolených jednotkách. Měření je součástí experimentu.

Všechna měření by se měla řídit podle zákona o metrologii (metrologického zákonu) č. 505/1990 Sb. v pl. znění a dle velkého množství navazujících prováděcích a souvisejících předpisů. Zákon zajišťuje jednotnost a správnost měřidel a měření. Zákon dále určuje kategorie měřidel (etalony, stanovená měřidla, pracovní měřidla a informativní měřidla). Dále pak základní pojmy jako kalibrace, ověření, úřední ověření. V neposlední řadě je potřeba myslet na to, že i nejlepší prováděná měření, je zatíženo chybami a nejistotami měření. Chyby a nejistoty měření jsou popsány v kapitole 7. [5]

Hlavní význam měření:

- a) Charakterizuje měřenou veličinu významně přesněji než kvalitativní údaje (dlouhý, vysoký, těžký).
- b) Dovoluje měření opakovat a porovnávat.
- c) Výsledek lze zpracovávat matematickými prostředky, zejména ve vědeckých aplikacích. [35]

MĚŘICÍ METODY

Dle metrologického hlediska se dělí na metody přímé a nepřímé. Metody přímé jsou založeny na porovnávání měřené fyzikální veličiny s cejchovní veličinou stejného druhu. Metody nepřímé jsou založené na výpočtu číselné hodnoty určované veličiny, pokud je znám vztah (funkční závislost) k jedné nebo více měřeným veličinám. [9]

MĚŘICÍ PŘÍSTROJ

Měřicí přístroj (měřidlo) je zařízení, které se používá k určování hodnoty měřené veličiny. Měřená veličina, nebo veličina na ní závislá, je cejchováním převáděna na údaj v odpovídajících fyzikálních jednotkách. Měřicí přístroje se dělí na analogové a digitální.

Měřicí přístroj se skládá ze dvou základních částí, kterými jsou snímač a výstupní zařízení. Obě části měřicího přístroje tvoří buď jeden celek anebo jsou oddělené. [9]

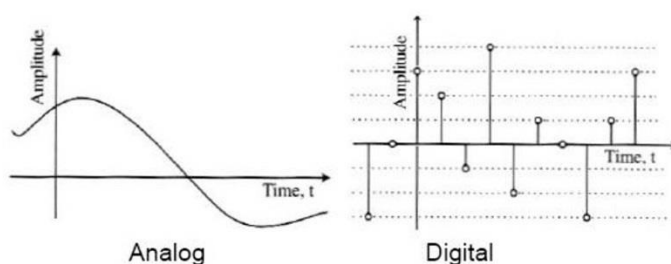
KALIBRACE

Je soubor úkonů, které dávají za určených podmínek závislost mezi hodnotami indikovanými měřicím přístrojem a mezi hodnotami realizovanými referenčním etalonem. [5]. Kalibraci je vhodné provádět vždy před a po měření a je nutné kalibrovat celý měřicí řetězec. Kalibraci může provádět každá instituce, která vlastní referenční etalon s platným kalibračním listem, má odpovídající prostory, zařízení a kvalifikované pracovníky. Podle potřeby a zejména pak podle přesnosti kalibrovaného snímače, kalibraci provádí ČMI, AKL, AMS anebo se provádí vnitropodnikově. Dokladem o kalibraci je kalibrační list.

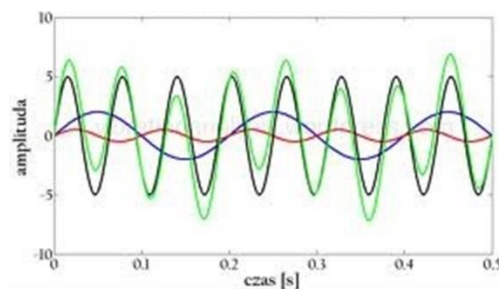
4.2 ANALÝZA A ZPRACOVÁNÍ SIGNÁLU

4.2.1 SIGNÁL

Je fyzikální veličina, jež slouží k přenosu zprávy. Zpráva může obsahovat určité množství informací. Signál může být reprezentován popisem závislosti jednoho parametru (závislá proměnná) na parametru jiném (nezávislá proměnná). Nejčastěji je jako nezávislá proměnná čas, může to být ale cokoliv jiného. Signály mohou být optické, elektrické, elektromagnetické, akustické, mechanické, pneumatické, hydraulické. Dle vlastností signálu rozeznáváme signály periodické, jednorázové, harmonické, deterministické, stochastické, analogové, digitální atd. Převody signálů se provádí pomocí převodníků (kvalita převedeného signálu závisí na kvalitě převodníku). Pro převod analogového signálu na digitální se používají A/D převodníky. Pro zamezení vniku parazitních prvků do signálu (šum, elektromagnetické záření apod.) se používají ochrany signálu. Ochrana může být pasivní (filtry) a aktivní (stínění). Aby bylo možné se signály efektivně a korektně dále pracovat, je často nutné signály zesílit (zesílení provádí zesilovače). V technickém měření je nejdůležitější a nejvíce používaný elektrický signál, který je charakterizován periodou či frekvencí.



Obr. 4.1: Analogový a digitální signál



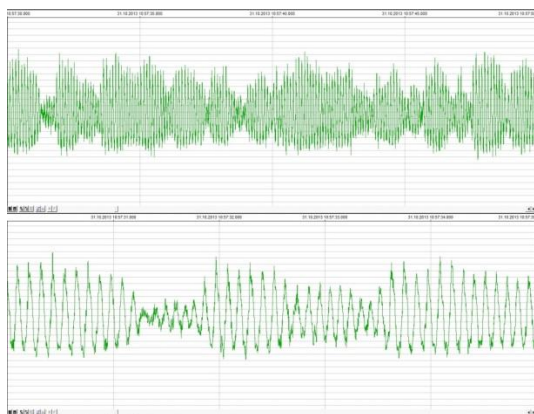
Obr. 4.2: Elektrický signál při různých frekvencích

4.2.2 VZORKOVÁNÍ

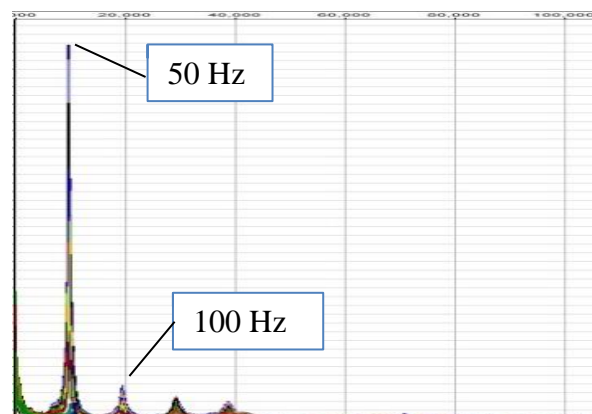
Je proces, při kterém ze signálu spojitého v čase vzniká signál diskretní v čase. Vzorkovací perioda (frekvence) se volí dle potřeby a měřené veličiny. Vzorkování se používá vždy, když se převádí analogový signál na digitální a obráceně. Na vhodné volbě vzorkovací frekvence často závisí úspěšnost celého měření. Vzorkovací frekvence se volí tak, aby bylo zachováno co nejvíce informací obsažených v signálu, ale zároveň je nutné ji volit tak, aby velikost naměřených dat byla přijatelná pro další zpracování.

4.2.3 FOURIEROVA TRANSFORMACE

Je vyjádření časově závislého signálu pomocí harmonických signálů (funkcí \sin a \cos) a slouží pro převod signálů z časové oblasti do frekvenční. Signál může být buď ve spojitém, nebo diskretním čase a je vhodné, aby byl periodický. Umožňuje analyzovat frekvenční obsah (spektrum) signálu. V praxi se častěji používá rychlá Fourierova transformace (FFT). V technickém měření má FFT nezastupitelnou roli a používá se například pro zjišťování frekvence kmitání konstrukcí anebo při určení parazitních vlivů v signálu.



Obr. 4.3: Ukázka spojitého periodického signálu



Obr. 4.4: Ukázka výsledků FFT

4.2.4 SNÍMAČ

Je označení pro technické zařízení, které je určeno pro snímání a detekci různých fyzikálních veličin, vlastností látek a technických stavů. Z hlediska přesnosti a produktivity měření mají největší praktický význam snímače s elektrickým výstupním signálem. Snímače se dělí na pasivní, aktivní a ostatní. V aktivních snímačích vzniká signál přímo ve snímači a nepotřebují zdroj energie. Do skupiny aktivních snímačů patří například indukční, piezoelektrické a termoelektrické. Pasivní snímače potřebují ke své činnosti zdroj elektrické energie (napájení) a mezi tyto snímače řadíme odporové, indukční, kapacitní atd. Do skupiny ostatních patří např. fotoelektrické či optické. Mezi důležité vlastnosti snímačů patří citlivost, linearita vstupní a výstupní odpor snímače atd.

4.3 MĚŘICÍ SYSTÉMY

Měřicí systémy se používají při měření (snímání veličin) a následném vyhodnocení (analýze) naměřených dat. Jsou tvořeny dvěma logickými celky, které jsou HW a SW. Tyto celky se ve většině případů skládají z několika dílčích prvků, kterými jsou měřicí ústředna, PC, měřicí program, vyhodnocovací program apod. Většina měřicích systémů je otevřená a plně rozšiřitelná jak po stránce hardwarové, tak i programové. Dodavatelé měřicích systémů mají většinou vyvinuté vlastní měřicí ústředny, které jsou dodávány zároveň i s vlastním měřicím a vyhodnocovacím programem. U většiny měřicích systémů je však možné kombinovat prvky od různých výrobců. Na trhu se vyskytuje velké množství měřicích systémů, které jsou buďto univerzální anebo jednoúčelové.

Vzhledem k rozsáhlosti problematiky a množství měřicích systémů (prvků), které se vyskytují v průmyslové a laboratorní praxi, bude v této kapitole dále popsán a rozebrán pouze měřicí systém a s ním související prvky, které byly využity při měření na VE Lipno I, viz Kapitola 9. Pro kompletnost jsou v Tab. 4.1 uvedeny někteří další výrobci měřicích systémů.

Tab. 4.1: Vybrané měřicí systémy

Výrobce:	Měřicí a vyhodnocovací SW:
National Instruments - USA	LabView
BMCM Messsysteme - SRN	NextView
BMC Messtechnik - SRN	FlexPro
EMS Pohl	Monitor
DEWETRON -ČR	Vlastní SW
HBM - SRN	Catman

4.3.1 MĚŘICÍ ÚSTŘEDNA EMS DV 803

Je ústředna určená pro rozsáhlé dynamické i statické měření v průmyslovém prostředí. Umožňuje přímé měření až 32 kanálů (tenzometrů, akcelerometrů, termočlánků a dalších čidel v různých kombinacích). Součástí každého kanálu je předzesilovač a samostatný šestnáctibitový A/D převodník se vzorkovací frekvencí až 3200 Hz (standardně) nebo až 6400 Hz (na přání).

Měřicí ústředna je určena k samostatným krátkodobým i dlouhodobým měřením, případně mobilním měřením (například k vibračním testům). Naměřená data se přenášejí do PC (NTB) přes ethernetové rozhraní. Díky velké interní paměti typu CF může být interval přenášení dat v řádu týdnů až měsíců. Součástí dodávky je obslužný program Monitor pro správu měření, grafické zobrazování naměřených dat a jejich export do jiných formátů. Pro přímou dálkovou správu měření je možno dodat GSM modem (GPRS/EDGE/3G) nebo modul bezdrátového ethernetu WiFi. [64]



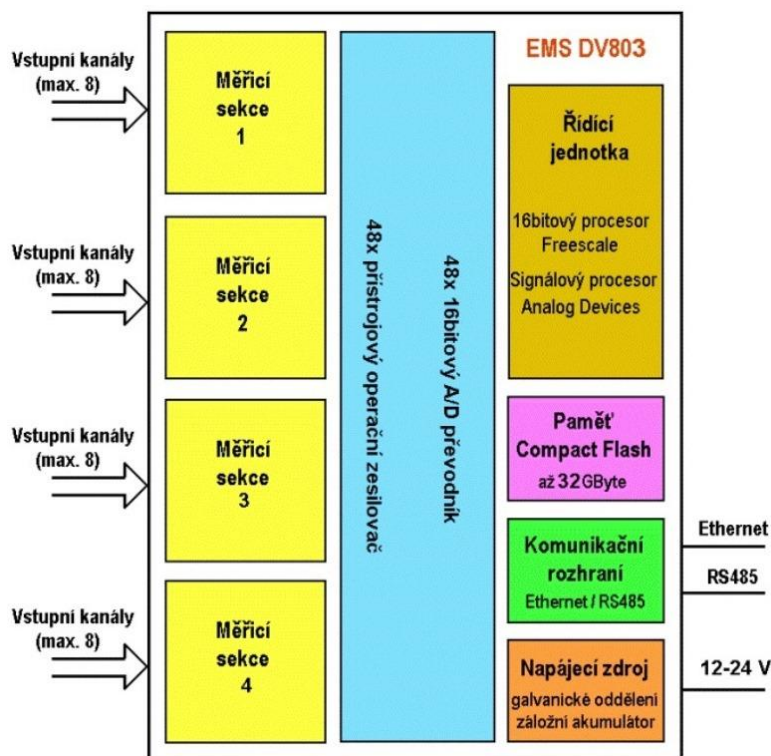
Obr. 4.5: Měřicí ústředna EMS DV 803 [64]



Obr. 4.6: Kovová skříň pro EMS DV 803

Tab. 4.2: Parametry a vlastnosti měřicí ústředny EMS DV 803 [64]

Počet měřených kanálů	<ul style="list-style-type: none"> • 32 hlavních, modulární koncepce (4 sekce) • 16 pomocných (například pro napájecí diagonály mostů)
Typy měřených čidel	<ul style="list-style-type: none"> • tenzometry (čtvrtmosty, půlmosty, celomosty) • akcelerometry • termočlánky, odporové teploměry • napěťové a proudové vstupy • uživatelsky definovaná čidla – možnost výroby specifických vstupně – výstupních sekcí (např. indukční snímače)
Vzorkovací frekvence	každý kanál 6400 Hz (volitelně od 0,5 Hz do 6400 Hz)
A/D převod	16 bitový , pro každý kanál samostatný A/D převodník, bez multiplexování – všechny kanály jsou měřeny synchrónně
Přesnost měření	lepší než $\pm 0,1\%$ (pro plný rozsah a provozní teplotu okolí)
Procesorová část měřicí ústředny	<ul style="list-style-type: none"> • řídicí šesnásobitový procesor (Motorola) • signálový procesor (Analog Devices)
Ukládání dat v měřicí ústředně	<ul style="list-style-type: none"> • datová paměť typu CF (kapacita až 32 GByte) • přímý zápis do paměti • výběr lokálních extrémů, filtrace, časový výběr • volitelné aplikace statistických metod (“stékání deště”)
Standartní komunikační rozhraní	Ethernet , RS485, možnost práce v síti
Volitelná rozšířená komunikace	GSM (GPRS/EDGE/3G) modem , WiFi bezdrátový ethernet, na přání dotykový TFT panel/display
Napájení	12 – 30 V DC, interní Li-Ion akumulátor až na 7 h provozu
Provedení	samostatná jednotka v kovové skříni IP 65 s průchodkami (rozměry podle typu skříně – např. 360x160x90 mm)
Provozní teplota okolí	od -20 do +75 °C , na přání je možno rozšířit
Ovládací program	Monitor 5.4.4 (win 2K, XP, Vista,7) – ovládání a správa měření, export do jiných formátů, zobrazení a přepočítání naměřených dat
Výrobce	Ing. Miroslav Pohl – Elektronické měřicí systémy - Brno



Obr. 4.7: Blokové schéma EMS DV 803 [64]

4.3.2 PROGRAM NEXTVIEW

Je univerzální ovládací, měřicí a vyhodnocovací program od německé společnosti BMC. Tento program je velmi snadno konfigurovatelný bez hlubších znalostí programování a obsahuje nástroje pro analýzu a zpracování dat. Program umožňuje export dat do dalších programů (zejména MS Excel) a to několika způsoby. K programu je dodáván doplněk zvaný NV4SCRIPT, což je software VisualBasic for applications. Pomocí tohoto jazyka lze již odzkoušené a často se opakující rutinní úlohy zautomatizovat.

Parametry a vlastnosti programu NextView:

- Zobrazování live dat, záznam naměřených hodnot, analýza naměřených dat
- Snadné nastavení systému pro měření (parametry kanálů, ukládání, vzorkování, spouštěcí funkce – trigger)
- Live-displej, rolování, ukládání dat přímo na pevný disk – závisí na HW
- Funkce pro analýzu dat (FFT, matematické funkce, jednoduchý a dvojitý integrál, derivace, digitální filtry, zobrazení x/y)
- Konvertování dat, přepočítání signálů na fyzikální jednotky
- Široké možnosti tisku průběhů, protokolů
- Kompatibilní s Win 2K, XP, Vista, 7
- Automatizace měřicích úloh pomocí makrojazyka SCRIPT
- Různé verze programu (Profesionál, Lite, Analysis, Trial), aktuální verze 4.5.485

[63]

5 TENZOMETRIE

Tenzometrie (dříve tensometrie) je metoda zjišťování napětí na základě měření změn materiálu sledované konstrukce. Při zjišťování napětí se používají tenzometrické snímače (tenzometry), které převádí měřenou deformaci na povrchu tělesa na elektrický odpor.

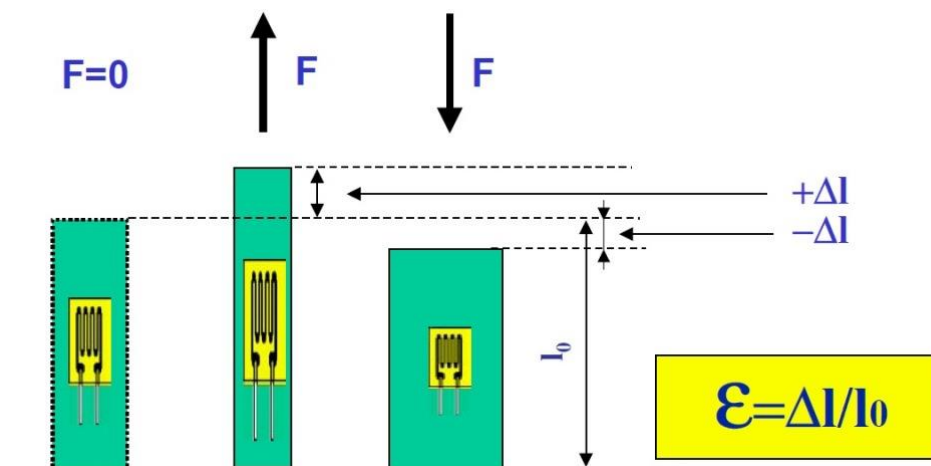
Jak už bylo řečeno, tenzometrickým měřením získáme velikost poměrných přetvoření, ze kterých obvykle stanovujeme mechanické napětí. Vztahy mezi poměrným přetvořením a napětím určují fyzikální zákony. Za předpokladu lineárního chování měřené součásti a snímače jsou vztahy dány Hookovým zákonem.

Tenzometrie patří do skupiny experimentálních metod ve vědní oblasti mechaniky těles. Historie praktické tenzometrie sahá do první poloviny dvacátého století. Ve druhé polovině dvacátého století se na trhu objevuje německá firma HBM, která dnes patří k největším a technicky nejvyspělejším výrobcům tenzometrů na světě. V ČR se výrobou tenzometrů a snímačů založených na principu tenzometrie zabývá firma VTS Zlín.

V dnešní době je tenzometrie hojně využívána experimentální metoda, která zasahuje téměř do všech technických věd. Zejména pak ve stavebnictví a strojírenství je její role nenahraditelná. Nejvíce se tenzometrie využívá v oblasti experimentální analýzy napětí, sil, tlaků a krouticích momentů a dále pak k výrobě snímačů tlaku, síly, zatížení a momentů síly.

5.1 PRINCIP ODPOROVÝCH TENZOMETRŮ

Vlivem zatížení se materiál deformuje. Deformace se projeví i na povrchu materiálu. Tato změna se přenáší na tenzometr, který takto mění svůj odpor, jenž je lineárně úměrný k prodloužení na povrchu materiálu. [41]



Obr. 5.1: Poměrná deformace tenzometru [42]

Odporový tenzometr je založen na poznatku, že elektrický odpor vodiče se mění, jestliže je vodič deformován. Připevní-li se vodič na předmět ve směru deformace a je-li známo jak se mění ohmický odpor vodiče v závislosti na jeho deformaci, pak se ze změny jeho odporu dá stanovit velikost deformace. Pro metalické odporové tenzometry platí pro relativní změnu odporu v závislosti na prodloužení vztah 5.1, respektive 5.2.

$$\frac{\Delta R}{R} = (1 + 2\mu) \frac{\Delta l}{l} \quad 5.1$$

$$\frac{\Delta R}{R} = k \cdot \varepsilon \quad 5.2$$

$\frac{\Delta R}{R}$ je odporová změna snímače [Ω]. Vzhledem k tomu, že změna odporu je velmi malá, zapojují se tenzometry do mostu, kde se hodnota zesílí.

$\frac{\Delta l}{l}$ je délková změna deformované součásti [$\mu\text{m}/\text{m}$]

k je deformační součinitel citlivosti (k -faktor)

[5] [31]

5.2 ZÁKLADNÍ PARAMETRY (VLASTNOSTI) ODPOROVÝCH TENZOMETRŮ

JMENOVITÉ ZATÍŽENÍ

Hodnota zatížení (měřené veličiny) nutná k dosažení jmenovitého výstupního signálu. [5]

DEFORMAČNÍ SOUČINITEL (K-FAKTOR)

Závisí zejména na typu tenzometru, na materiálu vodiče a geometrii vinutí tenzometru. Určuje se experimentálně a udává ho výrobce. Výrobce provádí na statisticky významném počtu kusů měření k -faktoru a uvádí na každém balení hodnotu k -faktoru včetně tolerance. K -faktor je bezrozměrný. Pro nejvíce používaný materiál – konstantan (slitina měď + nikl) je pak přibližná hodnota $k=2,05$. Rozptyl k -faktoru značně ovlivňuje přesnost měření. Důležitým parametrem, který ovlivňuje k – faktor je i teplota. Výrobce udává koeficient, pomocí kterého lze přepočítat hodnotu k -faktoru z teploty pokojové na teplotu měřeného místa. [4] [5] [31]

PŘÍČNÁ CITLIVOST SNÍMAČE

U tenzometru by mělo docházet ke změně odporu a tím i přetvoření pouze v tzv. „aktivní délce“. Jejich poměr by měl vyjadřovat deformační součinitel tenzometru. Někdy ale dochází i k deformaci ve směru příčném k aktivní délce.

Poměr deformačního součinitele ve směru osy snímače a v příčném směru se označuje jako příčná citlivost snímače. Jeho hodnota u snímače je 0,1 %. Nachází-li se snímač pro jednoosou napjatost v poli rovinné napjatosti, příčná citlivost má vliv na přesnost měření. K zamezení vlivu příčné citlivosti se nejčastěji používá zesílení na koncích jednotlivých smyček v měřicí mřížce. Potom dojde ke koncentraci příčného přetvoření na malý prostor a není tím ovlivněna celá aktivní část tenzometru. [4] [31]

LINEARITA

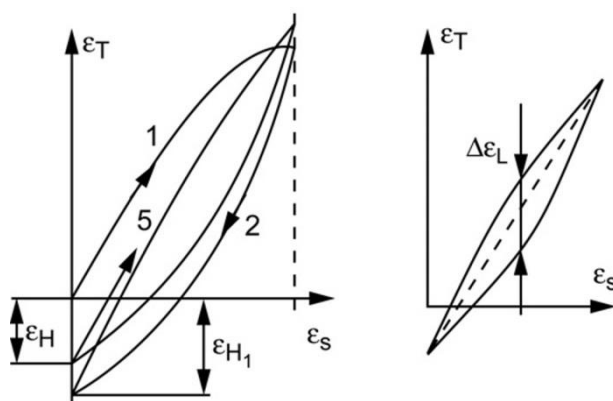
Závislost $\frac{\Delta R}{R}$ na ε není přesně lineární, odchylka od linearity se pohybuje okolo 0,1%. [31]

NELINEARITA

Maximální odchylka kalibrační křivky od přímky vedené v definovaném rozsahu zatížení vzhledem ke kalibrační křivce tak, aby odchylka byla v tomto rozsahu co nejmenší. [5]

HYSTEREZE (ϵ_H)

Maximální rozdíl mezi dvěma hodnotami výstupního signálu tenzometru pro totéž zatížení. Jedna hodnota je odečtena při stoupajícím zatížení od nuly do jmenovitého zatížení, druhá naopak při poklesu od jmenovitého zatížení na nulu. Po několika cyklech se zatěžovací a odlehčovací křivky téměř ztotožní a hystereze se ustálí na určité hodnotě. Hystereze nezáleží jen na tenzometru, ale i řadě jiných parametrů, které nám definují měřené místo (přípevnění, podložka, atd.). Při pečlivém nalepení tenzometru je obvykle hystereze v rozmezí (0,25-0,5%) měřené deformace. Samotný tenzometr má obvykle zanedbatelnou hysterezi (0,1%). Větší hysterezi může vykazovat materiál, na který je tenzometr nalepen. [4][5][31]



Obr. 5.2: Hysterezní křivka [4]

REPRODUKOVATELNOST

Maximální rozdíl mezi hodnotami výstupního signálu tenzometru při opakovaném zatěžování za stejných zkušebních podmínek. [5]

SLOUČENÁ CHYBA

Maximální rozdíl hodnot čtených z kalibrační křivky od referenční přímky, vyjádřený v % jmenovitého zatížení. Zahrnuje nelinearitu, hysterezi a reprodukovatelnost. [5]



Obr. 5.3: Vlastnosti výstupního signálu v závislosti na zatížení [5]

RELAXACE

Poměrná deformace měřená snímačem na dlouhodobě zatížené součásti se při konstantní deformaci v závislosti na čase mění – tento jev označujeme relaxací. Tenzometr po součásti „prokluzuje“ a měří jiné deformace. Pohybuje se řádově pod 1% a mění se s časem. [31]

IZOLAČNÍ ODPOR

Hodnota odporu, měřená mezi elektrickým obvodem snímače a tělesem snímače. [5]

PŘÍPUSTNÉ NAPĚTÍ NA SNÍMAČI

Výrobce udává maximální možnou napět'ovou zátěž tenzometru.

Pro výpočet dovoleného napájecího napětí lze odvodit vztah 5.3.

$$U_b = 2\sqrt{R \cdot S \cdot N} \quad 5.3$$

U_b je napájecí napětí [V]

R je ohmický odpor snímače [Ω]

S je plocha mřížky [m^2]

N je tepelné zatížení mřížky [W/mm^2]

$N = 0,75 \cdot 10^{-2} \text{ W}/\text{mm}^2$ – dlouhodobě přesná měření

$N = 12,00 \cdot 10^{-2} \text{ W}/\text{mm}^2$ – maximální hodnota pro statická měření

$N = 48,00 \cdot 10^{-2} \text{ W}/\text{mm}^2$ – maximální hodnota pro dynamická měření

[4] [31]

VLIVY PROVOZNÍCH PODMÍNEK NA TENZOMETRICKÉ MĚŘENÍ

Parazitní vlivy, působící na odporové tenzometry, určují přesnost měření. Jejich vliv je nežádoucí a snažíme se je snížit na minimum.

VLIV TEPLOTY

Změna teploty měřené součásti se projeví změnou rozměrů měřené součásti, snímače a specifického odporu. Tyto změny mají za následek změnu odporu, viz vztah 5.4.

$$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_T = \int_{T_0}^T [\alpha_R + k(\alpha_S - \alpha_V)] dT \quad 5.4$$

α_R je teplotní součinitel elektrického odporu materiálu mřížky [1/°K]

α_S, α_V jsou teplotní součinitele délkové roztažnosti materiálu součásti, resp. materiálu vinutí mřížky [1/°K]

Změna teploty se projeví poměrnou deformací $\varepsilon_T = k \left(\frac{\Delta R}{R}\right)_T$.

- Vliv teploty se dá vyloučit:
 - Kompenzací dalším tenzometrem
 - Autokompenzací
 - Korekcí naměřených výsledků
 - Zapojení do mostu
- a) Kompenzací dalším tenzometrem lze provádět za ustálených teplotních poměrů a konkrétních podmínek. Kompenzační tenzometr má stejnou konstrukci a stejné vlastnosti (stejný k -faktor, stejný ohmický odpor) jako tenzometr měřicí a je zapojen v sousedním rameni měřicího můstku. Musí být přilepen na nezátížené podložce se stejným součinitelem tepelné roztažnosti jako tenzometr měřicí a vystaven stejným tepelným vlivům. Umístíme ho co nejbližší měřenému místu. Při měření za neustálených teplotních podmínek je ovšem tato kompenzace nedostačující.
- b) Autokompenzace (automatická teplotní kompenzace) se provádí většinou tak, že vinutí tenzometru je zhotoveno alespoň ze dvou částí různé délky a různých kovů. Tím lze dosáhnout nezávislosti součinitele deformační citlivosti k na teplotě v určitém teplotním pásmu. Renomovaní výrobci přikládají grafy tohoto typu (případně i jejich analytické vyjádření ve tvaru polynomu) k jednotlivým balením svých tenzometrů, viz příloha A.2.
- U samokompenzačních tenzometrů musí být splněna podmínka $\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_T = 0$. Vyrábí se tenzometry, které jsou určeny pro aplikace na materiály s těmito součiniteli:
- $\alpha_S = 12 \cdot 10^{-6} - 16 \cdot 10^{-6}$ [1/°K] – uhlíková (austenitická) ocel
 $\alpha_S = 23 \cdot 10^{-6}$ [1/°K] – slitiny hliníku
 $\alpha_S = 65 \cdot 10^{-6}$ [1/°K] – plastické hmoty
 [4] [5] [31]
- c) Teplotní kompenzací je možné realizovat i elektrickým zapojením, a to zapojením do ¼. mostu. [42]

VLIV VLHKOSTI

Změny vlhkosti v průběhu měření, ale i během instalace tenzometru, mohou způsobit nekontrolované změny v nulové hodnotě a deformační citlivosti tenzometru a měření potom bude zatíženo chybou. Vlhkost vniká do materiálu podložky a většiny lepidel a mění jejich fyzikální vlastnosti. Může způsobit vzduť a pokrčení překrytí tenzometru. V krajním případě může dojít i k úplnému odlepení tenzometru. Působením vlhkosti se snižuje izolační odpor. Při statických měřeních nesmí poklesnout izolační odpor pod 50 k Ω , což se musí kontrolovat při měření. Pro úspěšné měření ve vlhkém prostředí je potřeba použít vhodné a spolehlivé krycí prostředky a přesně dodržet podmínky pro jejich aplikaci. [4] [5] [31]

VLIV CYKlickÉHO ZATĚŽOVÁNÍ

U tenzometrických snímačů dochází vlivem cyklického zatěžování k poruše únavou. Mez únavy lze považovat při maximálním zatížení pro počet cyklů řádově 10^5 . Maximální drift nulových hodnot se pohybuje v rozmezí $\pm 10 \mu\text{m/m}$. [31]

VLIV FREKVENCE NAMÁHÁNÍ

Frekvence, při nichž dochází k ovlivnění měření, jsou poměrně vysoké. Z toho plyne, že frekvence cyklického zatěžování přímo neovlivňuje měření, ale měření jsou limitována měřicími a záznamovými přístroji. V určitých případech zatěžování je možné, že přetvoření které vznikne pod tenzometrem má tak malou vlnovou délku, že tenzometr dokáže zprůměrovat vzniklé špičky a udává pouze střední hodnotu přetvoření. [4] [31]

VLIV POLOMĚRU ZAOBLENÍ

Tenzometry je možno lepit i na válcové plochy. Ovšem tenzometry jsou limitovány křivostí plochy. [31]

VLIV RADIOAKTIVNÍHO ZÁŘENÍ

Působením záření (α, β, γ a neutronového) dochází k nežádoucímu ovlivnění organických podložek tenzometrů a lepidel. Vlivem ozáření prudce klesá izolační odpor snímačů a dále dochází k výrazné změně jejich vlnutí. Použití standartních snímačů v poli radioaktivního záření může být pouze krátkodobé. Doporučuje se použití speciálních tenzometrů a speciální metody aplikace. [4] [31]

VLIV MAGNETICKÉHO POLE

Jestliže je feromagnetický materiál vystaven působení magnetického pole, dochází díky magnetostrickci ke geometrickým změnám tohoto materiálu, které jsou přenášeny i na aplikovaný tenzometr. Dnešní tenzometry jsou na tento jev málo citlivé a to je dáno tím, že jsou většinou vyráběné ze slitiny Cu-Ni. [4]

Poznámka: Magnetostrickce je změna rozměrů materiálu při zmagnetování.

VLIV CREEPU (TEČENÍ)

Objevuje se při dlouhodobém zatížení materiálu. Efekt se vyskytuje na místě instalace tenzometru, kdy v případě konstantního statického zatížení po čase dochází k poklesu měřené veličiny. Na velikost creepu má vliv i použité lepidlo. Creep se dá kompenzovat dvěma způsoby a to tak, že se použije tenzometr, který je konstrukčně uspořádán tak, že se u něho creep nevyskytuje, anebo lze využít „after“ efekt, který je opakem creepu. [4] [42]

HYDROSTATICKÝ TLAK

Pokud v daném prostředí není hydrostatický tlak srovnatelný s měřeným napětím materiálu, je jeho vliv na měření zanedbatelný. Tenzometry vydrží tlak až 1000 MPa bez poškození. Nejdůležitějším faktorem je zde kvalita lepení tenzometru. [4]

5.3 ROZDĚLENÍ ODPOROVÝCH TENZOMETRŮ

Rozdělení provedeme na dvě základní skupiny, a to na kovové a polovodičové (o polovodičových snímačích se jenom zmíníme). Skupinu kovových tenzometrů rozdělíme dle dalších kritérií a zaměříme se zejména na tenzometry fóliové, které jsou v dnešní době nejvíce využívány. Novodobé měření na spirále VE Lipno bylo realizováno fóliovými tenzometry. Z hlediska historie je třeba rozebrat i tenzometry drátkové. Dřívější měření na spirále VE Lipno bylo prováděno právě drátkovými tenzometry.

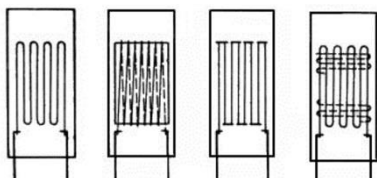
5.3.1 KOVOVÉ

Mřížka je tvořena kovem, např. konstantan, nichrom, platina, wolfram. Podle konstrukce je lze rozdělit na **příložné** a **lepené** a dle provedení mřížky je lze rozdělit na **drátkové**, **fóliové**, **vrstvé**.

a) Drátkové

Jsou to nejstarší typy tenzometrů. Dnes již historická záležitost, ale i přesto mají v dnešní době uplatnění a to při měření za extrémních teplot. Speciální typy dokáží měřit při teplotách (270 až 950°C). Jsou tvořeny kovovým odporovým drátkem o průměru 5 až 25 μm . Drát má tvar mnohonásobné vlásenky. Konce aktivního odporového drátku jsou přiletovány na silnější vývody. Dělí se na lepené s podložkou, bez podložky a s volnou mřížkou (nelepené - příložné). [4] [5]

- Kovové tenzometry lepené s podložkou se lepí na podložku z papíru, plastické hmoty nebo kovu.
- Kovové tenzometry lepené bez podložky jsou někdy označovány jako „tenzometry s volnou mřížkou“. Používají se jako vysokoteplotní tenzometry, které se připevňují keramickým tmelem. [4]
- Kovové tenzometry nelepené příložné tvoří aktivní odporový článek, který není přilepen a odpadají tedy problémy s přenosem deformace na celý povrch odporového článku. Jejich výroba je velmi náročná na mechanické provedení. V současné době se tyto snímače využívají jen zřídka. Používají se jako snímače měření tlaku, tlakových sil, zrychlení,...[4] [5]



Obr. 5.4: Konstruktivní provedení drátkových tenzometrů

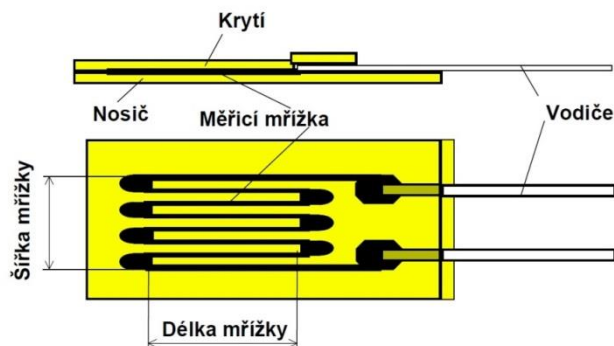


Obr. 5.5: Příložný tenzometr [4]

b) Fóliové

V současné době nejrozšířenější a nepoužívanější tenzometry. Mají obdélníkový průřez a jsou zhotoveny z fólie tloušťky 1 až 10 μm uložené na nosné podložce. Jednoduchá a dokonalá výroba, která je analogická výrobě plošných spojů v radiotechnice. Tato metoda umožňuje vyrobit takřka libovolný tvar a vzájemně přesné geometrické uspořádání měřicích mřížek. Tvar měřicí mřížky je vytvořen většinou leptáním. Jejich významné vlastnosti a přednosti jsou zejména:

- Lineární závislost deformace na změně odporu
 - Dobré kopírování měřené deformace (ohebnost)
 - Dobrá připevnitelnost
 - Mechanická odolnost
 - Malý vliv změn teploty
 - Životnost až 10 milionů cyklů
 - Měření deformací až do jednotek mm/m (např. 50 000 $\mu\text{m}/\text{m}$)
 - Velký výběr velikostí i tvarů
 - Nominální odpor tenzometrů obvykle 120,240,350,700 nebo 1000 Ω
 - Napájení až desítkami voltů (např. 23 V)
 - Zatížitelnost proudovou hustotou až 100 A/mm²
 - Pracovní teplotní rozsah -200°C až 250°C
 - Tloušťka fóliového meandru 3 až 6 μm
 - Tloušťka celého senzoru do 100 μm
 - Rozměry v jednotkách až stovkách mm
- [4] [5] [41] [42]



Obr. 5.6: Fóliový tenzometr firmy HBM [42]

c) Vrstvové

Jsou určeny pro speciální aplikace. Užívají se téměř výlučně pro konstrukci senzoru tlaku. Tenzometry jsou vytvořeny přímo na zadní straně membrány. Jsou vyráběny tak, že se kovová vrstva nanese přímo na pružinový materiál.

5.3.2 POLOVODIČOVÉ

Podstata spočívá ve výrazné změně jeho odporu s mechanickou deformací. Jsou založeny na jevu piezoresistence některých materiálů (Si, Ge). Jsou tvořeny páskem vyříznutým z monokrystalů polovodiče znečištěného difuzí jiného materiálu. Tenzometry vyrobené z těchto materiálu jsou tvrdé a křehké. Jejich odpor může být při stejných rozměrech od několika Ω až do $M\Omega$, protože jeho hodnota závisí na stupni legování základního materiálu. U polovodičového tenzometru nelze vyjádřit závislost poměrné změny odporu na deformaci konstantou odpovídající k -faktoru metalických tenzometrů.

Ve srovnání s kovovými tenzometry má například křemíkový tenzometr vyšší deformační citlivost, lepší dlouhodobou stabilitu, vynikající odolnost vůči dynamickému namáhání a při zvýšených teplotách se elasticky deformuje až do meze své pevnosti. Tvarová konstrukce je obdobná jako u kovových. I když jsou po teoretické stránce již dostatečně propracované, nedosáhly zatím úrovně a stupně rozšíření tenzometrů kovových. Jejich přímé použití je omezeno jen na jednoosou napjatost (jednoosé provedení). Polovodičové tenzometry se hojně využívají jako měrný člen ve snímačích (siloměry, tlakoměry, akcelerometry,...). V ČR je vyrábí VTS Zlín. Jejich významné vlastnosti a přednosti jsou:

- Vysoký součinitel citlivosti (téměř 100x větší než kovové tenzometry)
 - Vysoká přesnost a citlivost
 - Vysoká únavová životnost
 - Široký frekvenční rozsah měření
 - Vysoká životnost (až 10^9 cyklů)
 - Vysoká stabilita (neprojevuje se hysterze, drift, creep a to v širokém rozmezí teplot až do 300°C)
 - Odolnost proti soustavnému přetěžování do 200% jmenovitého rozsahu
 - Malé rozměry a nízká hmotnost
- [4] [5] [43]



Obr. 5.7: Polovodičový tenzometr VTS Zlín s podložkou [43]



Obr. 5.8: Tlakoměr VTS Zlín, kde je měrný člen z polovodičového tenzometru [43]

5.4 DRUHY A TYPY POUŽÍVANÝCH ODPOROVÝCH TENZOMETRŮ

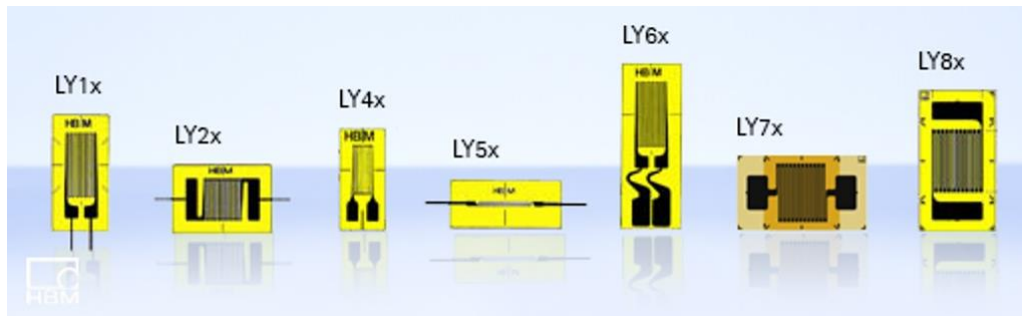
Při výběru vhodného typu tenzometru je nutno myslet na řadu hledisek. Většinou se vychází z měřeného objektu (součásti), respektive z problému, který budeme řešit pomocí tenzometru. Mezi nejdůležitější kritéria výběru tenzometru patří stav vyšetřované napjatosti, velikost měřeného objektu, materiál z kterého je součást vyrobena, prostředí ve kterém se objekt nachází a spousta dalších parametrů. Z těchto kritérií plyne výběr a zohlednění použitého tenzometru. Při výběru se vychází zejména z těchto parametrů: použití tenzometru na potřebnou aplikaci, počet měřicích mřížek, délka měřicí mřížky, maximální poměrná protažitelnost, únavová pevnost, jmenovitý odpor, požadovaná přesnost měření, teplotní rozsah, závislost charakteristických údajů na teplotě, atd. Nejčastěji se používají tenzometry s jmenovitým odporem 350 Ω a 120 Ω . Používají se výhradně samokompenzační tenzometry. V ČR se nejvíce používají tenzometry firmy HBM.

Odporové tenzometry se vyrábějí v různých typech a velikostech. Existují tenzometry pro běžné použití, ale i pro speciální aplikace. V této kapitole se pokusíme popsat nejdůležitější tenzometry dle jejich aplikace.

5.4.1 JEDNOOSÁ NAPJATOST

Je určena jedním hlavním napětím působícím v hlavním směru. Známe-li tento směr, pak k určení stačí měřit deformaci v hlavním směru pomocí jednoduchého snímače (jednoosého tenzometru). [31]

Hlavní napětí se stanoví z Hookova zákona, viz 3.5.1



Obr. 5.9: Jednoosé tenzometry HBM [41]

5.4.2 ROVINNÁ NAPJATOST

Je určena dvěma nenulovými, vzájemně kolmými napětími. Pro určení rovinné napjatosti se používají tzv. tenzometrické kříže, kdy jsou známy polohy směrů napětí. Při neznámých směrech se musí měřit deformace ve třech směrech. K měření se používají tzv. tenzometrické růžice, které jsou buď pravoúhlé (tři snímače ve směrech 0°, 45°, 90°), anebo delta růžice (tři snímače ve směrech 0°, 120°, 240°). Rozdíly mezi oběma typy růžic jsou minimální. [31]

Tenzometrické kříže a růžice spadají do skupiny vícenásobných tenzometrů, které se skládají z více jednotlivých měřicích mřížek na jedné společné podložce. Jejich jednotlivé měřicí základny jsou na společné podložce umístěny v přesně orientovaných směrech a s přesně předepsanou roztečí. Výhoda je v rychlejší a levnější instalaci oproti jednoosým tenzometrům. [4]

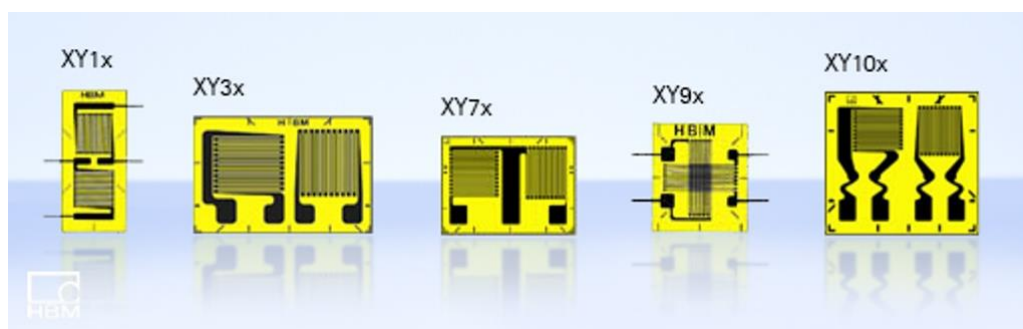
a) Tenzometrické kříže

Mají dvě nezávislá vinutí pod úhlem 90° . Vyrábí se ve více výrobních řadách a nejznámější jsou typy X, L, T, V, které jsou pojmenované podle tvaru křížení měřících základů. [4]

Vyhodnocení napětí z měřených deformací pro tenzometrické kříže je následující. Z naměřených poměrných přetvoření ε_I a ε_{II} ve dvou hlavních směrech stanovíme dvě hlavní napětí σ_I , σ_{II} ze vztahu 5.5 a 5.6. [41]

$$\sigma_I = \frac{E}{1 - \mu^2} (\varepsilon_I + \mu \varepsilon_{II}) \quad 5.5$$

$$\sigma_{II} = \frac{E}{1 - \mu^2} (\varepsilon_{II} + \mu \varepsilon_I) \quad 5.6$$



Obr. 5.10: Tenzometrické kříže HBM [41]

b) Tenzometrické růžice

Rozdíly mezi typy růžic jsou minimální. Pravoúhlé růžice se používají tam, kde lze směry hlavních napětí alespoň přibližně odhadnout. Delta růžice se používají na místa, kde nelze odhadnout směry hlavních napětí.

Podobně jako tenzometrické kříže i tenzometrické růžice se vyrábějí ve více výrobních řadách, které se od sebe liší umístěním měřících mřížek na podložce a velikostí, viz Obr. 5.12

Vyhodnocení napětí z měřených deformací pro tenzometrické růžice je následující. Z naměřených poměrných přetvoření ε_a , ε_b , ε_c se stanoví dvě hlavní přetvoření ε_I , ε_{II} viz vztahy 5.7, 5.10 anebo dvě hlavní napětí σ_I , σ_{II} viz vztahy 5.8, 5.11. Na rozdíl od tenzometrických křížů se musí ještě určit směr hlavních přetvoření (napětí), viz vztahy 5.9, 5.12 a 5.13 až 5.17. [41]

Pravoúhlé růžice ($0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$)

$$\varepsilon_{I,II} = \frac{\varepsilon_a + \varepsilon_c}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_a - \varepsilon_c}{2}\right)^2 + \left(\frac{2\varepsilon_b - \varepsilon_a - \varepsilon_c}{2}\right)^2} \quad 5.7$$

$$\sigma_{I,II} = \frac{E}{1-\mu} \cdot \frac{\varepsilon_a + \varepsilon_c}{2} \pm \frac{E}{\sqrt{2} \cdot (1+\mu)} \cdot \sqrt{(\varepsilon_a - \varepsilon_b)^2 + (\varepsilon_c - \varepsilon_b)^2} \quad 5.8$$

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{2\varepsilon_b - \varepsilon_a - \varepsilon_c}{\varepsilon_a - \varepsilon_c} \quad 5.9$$

Delta růžice (0°, 60°, 120°)

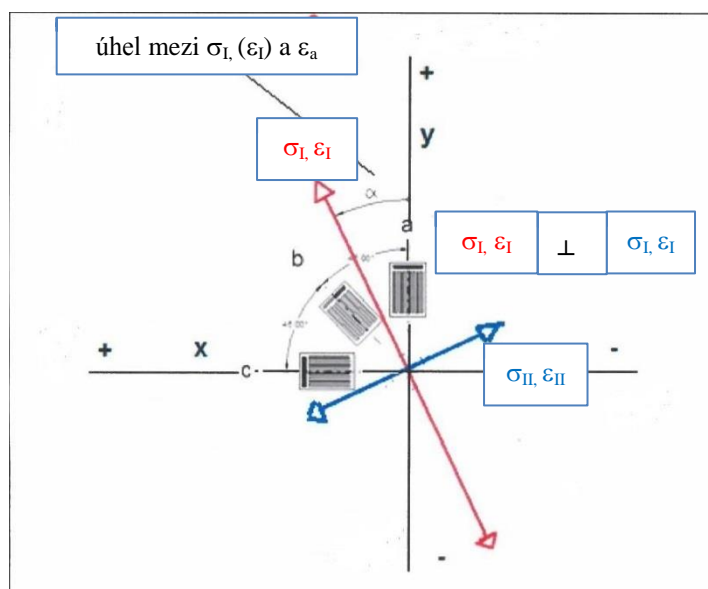
$$\varepsilon_{I,II} = \frac{\varepsilon_a + \varepsilon_b + \varepsilon_c}{3} \pm \sqrt{\left(\frac{2\varepsilon_a - \varepsilon_b - \varepsilon_c}{3}\right)^2 + \frac{1}{3}(\varepsilon_b - \varepsilon_c)^2} \quad 5.10$$

$$\sigma_{I,II} = \frac{E}{1-\mu} \cdot \frac{\varepsilon_a + \varepsilon_b + \varepsilon_c}{3} \pm \frac{E}{1+\mu} \cdot \sqrt{\left(\frac{2\varepsilon_a - \varepsilon_b - \varepsilon_c}{3}\right)^2 + \frac{1}{3}(\varepsilon_b - \varepsilon_c)^2} \quad 5.11$$

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{\sqrt{3} \cdot (\varepsilon_b - \varepsilon_c)}{2\varepsilon_a - \varepsilon_b - \varepsilon_c} \quad 5.12$$

Úhel α udává odklon směru hlavního napětí (přetvoření) σ_I (ε_I) od směru snímače a růžice ve směru proti otáčení hodinových ručiček.

Celá teorie vyhodnocení dvojosé napjatosti vychází z Mohrovy kružnice, viz 3.2.3.



Obr. 5.11: Zobrazení tenzometru a složek hlavních napětí (přetvoření) při vyhodnocení dvojosé napjatosti

Poznámka: U měření dvojosé napjatosti se používá ekvivalentní značení hlavních přetvoření a hlavních napětí a je následující $\varepsilon_I = \varepsilon_{\max}$ a $\varepsilon_{II} = \varepsilon_{\min}$, $\sigma_I = \sigma_{\max}$ a $\sigma_{II} = \sigma_{\min}$.

Jak je vidět na Obr. 5.11, pro určení úhlu α je nutno určit znaménka čitatele (Z) a jmenovatele (N). Protože to je jediný způsob, jak určit ve kterém kvadrantu svírá napětí (přetvoření) se směrem a růžice úhel. Celkem jsou 4 kvadranty.

$$tg\psi = \frac{\text{protilehlá}}{\text{přilehlé}} = \frac{Z}{N} \quad 5.13$$

Ze vztahu 5.14 a teorie plyne, že úhel α se vypočítá dle vztahů 5.14 až 5.17.

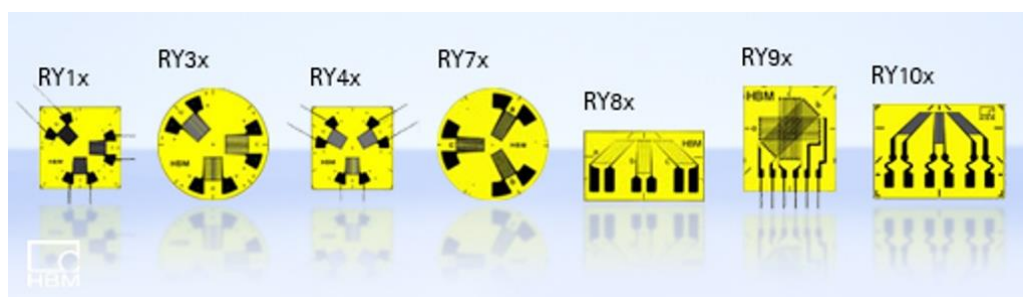
$$\left\{ \begin{array}{l} Z \geq 0(+) \\ N > 0(+) \end{array} \right\} \alpha = \frac{1}{2} (0^\circ + |\psi|) \quad 5.14$$

$$\left\{ \begin{array}{l} Z > 0(+) \\ N \leq 0(-) \end{array} \right\} \alpha = \frac{1}{2} (180^\circ - |\psi|) \quad 5.15$$

$$\left\{ \begin{array}{l} Z \leq 0(-) \\ N < 0(-) \end{array} \right\} \alpha = \frac{1}{2} (180^\circ + |\psi|) \quad 5.16$$

$$\left\{ \begin{array}{l} Z < 0(-) \\ N \geq 0(+) \end{array} \right\} \alpha = \frac{1}{2} (360^\circ - |\psi|) \quad 5.17$$

[41]

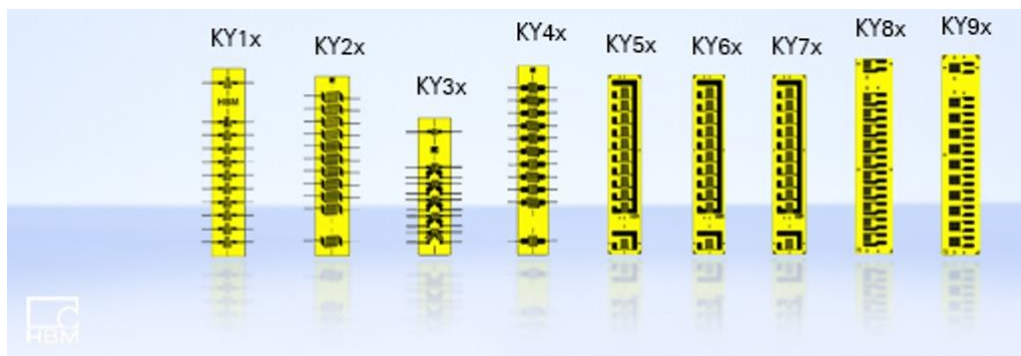


Obr. 5.12: Tenzometrické růžice HBM [41]

5.4.3 GRADIENT NAPĚTÍ

Měrné pole napjatosti může být homogenní a nehomogenní, charakterizované gradientem napětí. Při homogenní napjatosti se volí velikost základny tenzometru 6 až 10 mm. Při nehomogenní napjatosti musí být v souladu velikost gradientu napětí s velikostí základny snímače. Nehomogenní materiál je např. beton, nebo dřevo. Pro měření gradientů napětí se vyrábí tenzometrické řetězce, u nichž je možno měnit různá uspořádání mřížek. [31]

Tenzometrické řetězce jsou kombinací měřicích mřížek stejného typu na stejné základně v pravidelných intervalech. Řetězce s kříži nebo růžicemi obvykle obsahují 10, 15 měřicích mřížek nebo 5 skupin se třemi měřicími mřížkami. Na konci každého řetězce bývá umístěna jedna samostatná mřížka stejného typu, která slouží jako kompenzační nebo doplňující. [4]



Obr. 5.13: Tenzometrické řetězce HBM [42]

5.4.4 VLASTNÍ (REMANENTNÍ) NAPJATOST

V technických materiálech v důsledku technologie výroby a dalšího zpracování prakticky téměř vždy existuje jistá zbytková napjatost, která působí v materiálu i když není výrobek namáhán vnějšími silami. Pro technickou praxi jsou důležitá především makroskopická zbytková napětí (napětí I. druhu).

Pro zjišťování zbytkového (remanentního) pnutí (napjatosti) jsou k dispozici metody, které jsou založeny na porušení rovnováhy vnitřních sil, vzniklých vlivem zbytkového pnutí. Princip spočívá v odstraňování materiálu z měřeného objektu v okolí nalepené tenzometrické růžice.

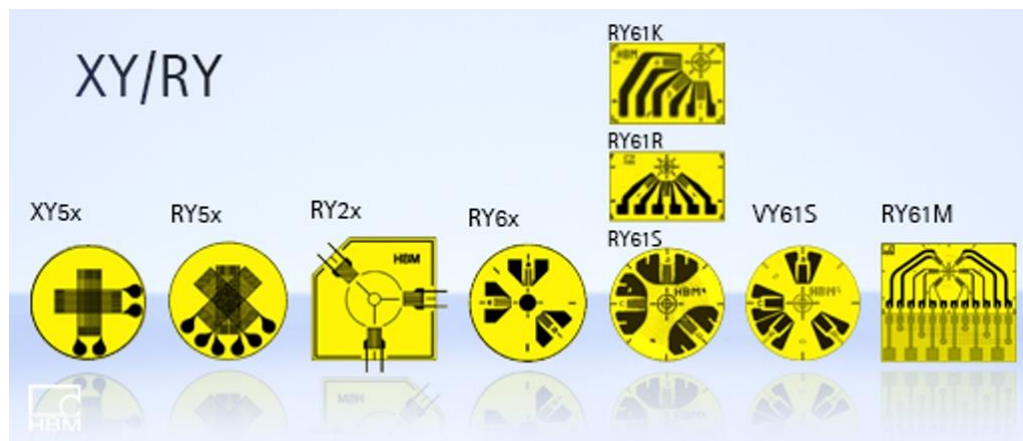
Vlastní napětí lze měřit tenzometrickou, tzv. odvrtávací metodou. Pro tuto metodu slouží odvrtávací zařízení MTS 3000. Zařízení pracuje tak, že frézka o otáčkách až 300 000 ot/min je zapouštěna po krocích do zkoušeného materiálu (přes tenzometrickou růžici) do hloubky až 1,6 mm. Tento proces je automaticky řízen programem z počítače. [42]



Obr. 5.14: Zařízení MTS 3000 [41]



Obr. 5.15: Zařízení MTS 3000 a tenzometrická růžice [42]



Obr. 5.16: Tenzometry pro určování zbytkového pnutí HBM [41] [42]

Vzhledem k rozsáhlosti a složitosti zmíněné napjatosti, ať už se jedná o teorii měření nebo vyhodnocení, není v této práci místo (ani to nemá diplomová práce za cíl) na širší rozebrání problematiky. Z tohoto důvodu je problematika pouze okrajově zmíněná.

5.4.5 SNÍMAČE PRO MĚŘENÍ VELKÝCH PRODLOUŽENÍ

Používají se zejména při měření na umělých hmotách. Speciální tenzometry dokáží měřit deformaci až do 10%. [31]

Firma HBM vyrábí snímač LD20 6/120.

5.4.6 SNÍMAČE PRO MĚŘENÍ ZA VYSOKÝCH TEPLOT

Horní hranice použitelnosti standardních tenzometrů je 120°C. Pokud je nutno měřit při vyšších teplotách, je potřeba použít speciální tenzometry. Tenzometry různých provedení dokáží měřit od -270°C až do 1000°C. Pro měření za vysokých teplot se používají zejména tyto konstrukce tenzometrů.

Tenzometr s volnou mřížkou se používá pro měření v extrémně vysokých nebo nízkých teplotách. Měřicí mřížka je připevněna na pomocné podložce, která se odstraní v průběhu připevňování. Pro připevňování se používá speciální keramický nástřik. [4]

Fóliový tenzometr s podložkou vyrobenou ze žáruvzdorné oceli, ke které je mřížka přilepena speciálním vysokoteplotním tmelem. [5]

Drátkový tenzometr je nalepen na samolepicí plastovou podložku s poměrně malou adhezí. Na měřený objekt se nanese vrstva vysokoteplotního tmelu, na kterou se pak přitlačí tenzometr podložkou vzhůru. Poté se podložka z vinutí tenzometru odlepí. Na vinutí tenzometru se nanese další vrstva tmelu a zahřeje se na teplotu kolem 950°C, čímž dojde k vytvrzení. [5]

Přivařovací vysokoteplotní tenzometry, které jsou určeny pro trvalé měření za nepříznivých podmínek. [4]

Firma HBM vyrábí například snímače:

LF30 3/120 a LF30 6/120

jsou to snímače s volnou drátkovou mřížkou (drát 0,5x0,05 CrN, Al).

Maximální teploty: statické měření -200 - +650°C

dynamické měření -200 - +760°C

Používané lepidlo: keramický tmel CR 760

5.4.7 SNÍMAČE ÚNAVOVÉ ŽIVOTNOSTI

Tyto snímače kumulují změny odporu způsobené cyklickým zatěžováním. Vinutí je zhotoveno ze speciální konstantové slitiny, u níž cyklické namáhání způsobuje strukturální změny, které se projevují změnou odporu. Tuto odporovou změnu je možno vyjádřit v závislosti na zbytkové životnosti. Při cyklickém namáhání s konstantní amplitudou je možno stanovit počet cyklů. [31]

Ze všech poznatků, které jsou uvedeny kapitole 5 plyne, že se vyskytuje téměř neomezené množství tenzometrů pro různé specifické použití. Kritéria pro výběr tenzometrů HBM a značení tenzometrů HBM jsou v příloze A.3 a A.4.

5.5 INSTALACE ODPOROVÝCH TENZOMETRŮ

Mezi základní požadavky dobrého měření vedle správně vybraného místa a s tím souvisejícím výběrem snímače patří i správné připevnění tenzometru k měřenému a měřicímu objektu. Je potřeba zajistit pevné spojení tenzometru s povrchem testované součásti tak, aby bylo docíleno přenosu deformace ze součásti na tenzometr s co nejmenšími ztrátami (nejlépe pokud možno beze ztrát).

Pro upevňování tenzometrů se používá několik technologií, avšak nejvíce převažuje lepení. Dalšími metodami, jako jsou technologie navařování podložky s tenzometrem, mechanické navinutí, upevnění pomocí keramických lepidel nebo metoda difúzních napařování polovodičových a kovových vrstev na povrchu tělesa snímače, se nebudeme dále zabývat. Vesměš jsou to speciální technologie pro speciální snímače. Jak už bylo řečeno, tak nejrozšířenější a nejpoužívanější metodou upevňování tenzometrů je lepení a dále bude rozebrán a popsán detailní postup lepení tenzometrů. V postupu budou popsány přípravy pro lepení a jejich správné použití. Postup lepení je následující:

MECHANICKÉ OČIŠTĚNÍ POVRCHU

Většinou se mechanické čištění provádí ve dvou krocích, a to hrubé čištění a jemné dočištění. Při prvním kroku se odstraní v dostatečném okolí místa lepení nátěry, laky, rzi, okuje, tmely atd. Na hrubé čištění se většinou používají ruční elektrické brusky. Při druhém kroku se provede dočištění již připravené plochy, a to většinou ručně smirkovým papírem. Účelem dočištění je zarovnání jamek, hrboлатosti a dalších nerovností.

CHEMICKÉ ČIŠTĚNÍ POVRCHU

Druhý stupeň čištění se provádí za účelem odmaštění povrchu. Odmaštění povrchu provádíme vatou (tampóny), které jsou napuštěny do chemicky čisté látky. Většinou se používá aceton, toluen, ether a podobně. Čištění provádíme pinzetou jednosměrně a tak dlouho, dokud se nedosáhne dokonalého očištění povrchu.

NALEPENÍ A LETOVÁNÍ TENZOMETRU

Lepení se provádí podle daného postupu výrobců a za pomoci speciálních lepidel.

Lepidla se dělí do několika skupin-na jednosložková (akrylátová), dvousložková (složena s pryskyřice a tekutého tužidla) a na vytvrditelná za běžné (pokojové) teploty nebo za zvýšené teploty. Dvousložkové lepidlo si připravíme tak, že pomocí odměrky odměříme prášek a do odměrky nakapeme 6 až 7 kapek tekutiny, poté se míchá až do zhuštění lepidla. (doba zhuštění zaleží na teplotě okolí a je zhruba při 0°-30minut, 20°-5 minut, 30°- 1 minuta).

Samotné lepení započneme přiložením tenzometru na připravenou plochu, a to z důvodu kontroly umístění snímače. V případě silně zakřivené plochy je potřeba tenzometr předem zdeformovat. Ještě před nanesením lepidla máme možnost kontroly velikosti a čistoty připravené plochy, můžeme si zkontrolovat orientaci tenzometru atd. Pokud je všechno v pořádku, přikročíme k nanesení lepidla (vrstvu volíme dostatečnou a to asi 0,5 mm) a přilepení na připravený povrch. Tenzometr překryjeme proužkem celofánu, přitlačíme palcem (síla 10 až 20 N) a otáčivým pohybem vytlačíme přebytky lepidla. Doba potřebná k dobrému přilepení tenzometru se značně odvíjí od vnějších podmínek (venkovní teplota, teplota součásti, konzistence lepidla,...). Při teplotě kolem 0°C se doporučuje doba cca 10 až 30 minut. Po vytvrzení lepidla opatrně odstraníme fólii (dáváme pozor, abychom neponičili, nebo neposunuli tenzometr), nalepíme poblíž tenzometru svorkovnici, ke které se pak přiletují přívody tenzometru. (pokud jsou přívody tenzometru pro přebytek lepidla nepřístupné, lze lepidlo roztavit pájkou a současně se přívody vytáhnou pinzetou).

Kvůli orientaci označíme snímače libovolnými čísly a růžice navíc označíme směry a,b,c. Měření s nalepenými snímači lze provádět až po určité minimální době, která je závislá na okolní teplotě. Vlastní cyklus lepení trvá i několik hodin, proto se snažíme nalepit co nejvíce tenzometrů najednou. Pokud se lepí více tenzometrů na jednu součást, je vhodné používat tenzometry z jedné série.

Používané typy lepidel HBM za běžné teploty:

Výhodami jsou krátká doba vytvrzení, jednoduchá aplikace a používají se pro experimentální napěťovou analýzu.

a) Lepidlo X60

Je dvousložkové (bílý prášek a tekutina) rychle tuhnoucí akrylátové lepidlo. Umožňuje měření v rozmezí teplot -200°C až 60°C pro statická měření a do 80°C pro dynamická měření. Lepidlo je určeno pro všechny kovy, pro velký počet nekovových materiálů (beton, porcelán, sklo, atd.) a různé druhy plastických hmot (akrylátové hmoty, PVC, polyester, epoxidové hmoty). Nelze s ním lepit teflonové hmoty a polyetylen. Lepidlo lze také použít pro ostatní materiály, ale je potřeba jej napřed odzkoušet, aby nenaleptal zkoušený materiál. Další využití lepidla je možné na přilepení patice svorkovnice. Při práci se složkami lepidla je zapotřebí dbát bezpečnostních pokynů firmy HBM.

b) Lepidlo Z70

Je kyanoakrylátové jednosložkové rychle lepicí sekundové lepidlo. Umožňuje měření do 120°C pro dynamické měření a do 100°C pro statické měření. Lepidlo se dá použít pro všechny obvyklé kovy a mnoho plastických hmot. Nelze s ním lepit teflon a polyetylen. Nedoporučuje se použít na porézní savé materiály (dřevo, beton, atd.). Vytvrzuje se stykem se zásaditě reagujícími látkami. Lepidlo lze použít pro všechny snímače HBM. Je schopno vytvrzovat i působením hydroxylových iontů obsažených ve vzdušné vlhkosti. Vytvrzování za daných podmínek je tím rychlejší, čím je vrstva tenčí. Optimální vytvrzovací podmínky jsou 60 až 80% vzdušné vlhkosti a teplota v rozmezí 15°C až 30°C . Také u tohoto lepidla je zapotřebí dbát bezpečnostních pokynů firmy HBM.



Obr. 5.17: Lepidlo HBM X60 [41]



Obr. 5.18: Lepidlo HBM Z70 [41]

Další lepidlo, které se používá, je X280. Jeho vlastnosti jsou podobné jako zmíněná lepidla.

Používané typy lepidel HBM za zvýšené teploty:

Výhodou je vysoká dlouhodobá stabilita a používají se pro vysoké teploty a výrobu snímačů. Mezi používaná lepidla patří například EP310 a nebo EP250.



Obr. 5.19: Lepidlo HBM EP310 [41]



Obr. 5.20: Lepidlo HBM EP250 [41]

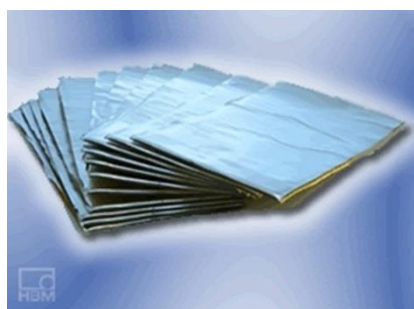
OCHRANA PROTI VNĚJŠÍM VLIVŮM

Vzhledem k tomu, že se se tenzometry často používají v terénu, v nečistém prostředí, v chemickém prostředí, ale i pod vodou, je potřeba během měření chránit tenzometry proti těmto vlivům. Dokonce i za ideálních podmínek je dobré chránit nalepený a zapojený tenzometr, a to zejména proti vlhkosti, která je všudypřítomná. Vhodné ochranné prostředky vybíráme podle dvou základních kritérií, a to zejména dle prostředí a délky měření. Některé ochranné prostředky dokáží chránit tenzometr ve velice nepříznivých podmínkách i několik let. Níže jsou uvedeny základní ochranné prostředky, jejich použití a vlastnosti od firmy HBM.



Obr. 5.21: Tuhý tmel HBM AK22 [41]

Je to permanentní plastický tmel, který může být použitý i pod vodou a doba použití je zhruba 1 rok. Dá se použít i pro tlakovou vodu do 40 MPa. Ve standartních venkovních podmínkách vydrží i několik let, přesná doba není známa. Má velmi dobrou teplotní stabilitu. Aplikuje se roztavením potřebného množství a následným nalepením. Teplotní rozsah použití je -50 až 170°C.



Obr. 5.22: Silikonový tmel s hliníkovou fólií HBM ABM 75 [41]

Je to permanentní plastický tmel, který svým rozsahem použití a vlastnostmi odpovídá tmelu AK22. Materiál je dodáván ve vrstvených prouzcích s 50 µm tlustou fólií. Je odolný proti vodě a povětrnostním podmínkám. Aplikuje se nalepením. Teplotní rozsah použití je -196 až 75°C.



Obr. 5.23: Polyuretanový lak HBM PU120/140 [41]

Je to lak, který vysušuje vzduch. Používá se jako spodní vrstva pod jiný krycí prostředek nebo jako samostatný krycí prostředek. Chrání před slunečním zářením, dotykem, prachem. Je odolný proti olejům a má dobrou otěruvzdornost. Zvyšuje letovací schopnosti. Aplikuje se potřením chráněného místa. Teplotní rozsah použití je -40 až 120°C.



Obr. 5.24: Nitrilová guma HBM NG150 [41]

Je to lak, který vysušuje vzduch. Vlastnostmi a aplikací je podobný PU120/140. Je odolný proti benzínu a olejům.



Obr. 5.25: Silikonová pryskyřice HBM SL450 [41]

Je to lak, který vysušuje vzduch. Používá se u měření za vysokých teplot. Aplikuje se nátěrem/potřením.



Obr. 5.26: Silikonová guma HBM SG250 [41]

Průhledná silikonová guma bez rozpouštědel je vhodná proti vlhkosti, nepříznivému počasí, proti vodě, oleji. Má velmi dobrou mechanickou ochranu. Teplotní rozsah použití je -70 až 250°C.

KONTROLA INSTALOVANÝCH TENZOMETRŮ

Kontrola probíhá před použitím v několika krocích, a to zejména takto:

Před nalepením zkontrolujeme snímač, jestli není mechanicky poškozen nebo není zvlhlý atd.

Po přilepení snímače a přiletování se kontroluje ohmmetrem ohmický odpor snímače a izolační odpor. Ohmický odpor snímače musí odpovídat jmenovité hodnotě (120, 350, 600 Ω atd.) a izolační odpor nesmí poklesnout pod 50 M Ω .

Po zapojení tenzometru do zesilovače (tenzometrické aparatury) a před nanesením ochrany proti vnějším vlivům (pokud je potřeba) se zkontroluje funkčnost tenzometru. To se provede přitlačením tenzometru při současném sledování výstupního signálu (kalibrace).

Po aplikaci ochrany proti vnějším vlivům se doporučuje znovu překontrolovat funkčnost tenzometru. Při aplikaci ochrany tenzometru je možné, že se tenzometr poškodí. Zde se provádí jenom vizuální kontrola na displeji tenzometrické aparatury. Doporučuje se také vizuální a elektrická (odpor) kontrola kabeláže.

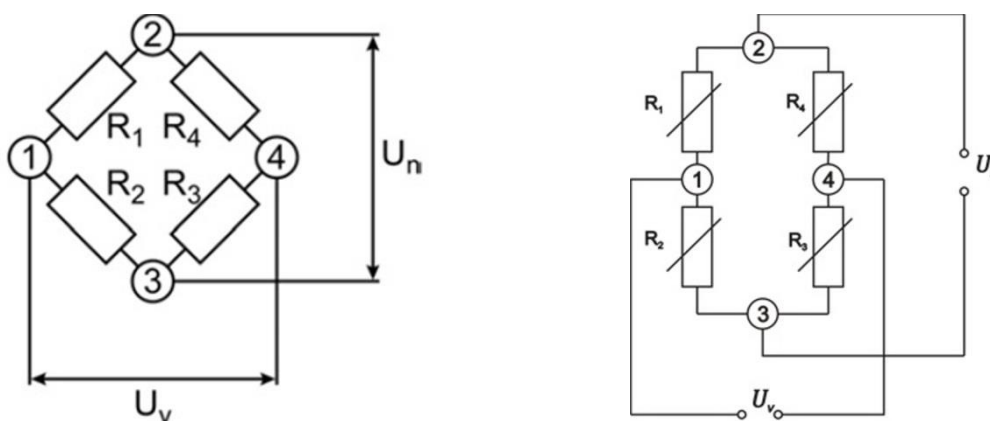
Celkový postup při instalaci tenzometru je znázorněn v příloze A.5.

[4] [5] [41] [42]

5.6 ZAPOJOVÁNÍ TENZOMETRŮ

Při běžných tenzometrických měřeních se měřená délková přetvoření pohybují v rozmezí ($10^{-3} - 10^{-6} \mu\text{m/m}$). Použijeme-li pro měření odporové tenzometry, je změna odporu tenzometru velmi malá ($2,4^{-1} - 2,4^{-4} \Omega$), běžným ohmmetrem neměřitelná, k jejímu vyhodnocení se proto používá můstkové zapojení. V tomto zapojení nevyhodnocujeme celkovou (absolutní) hodnotu odporu, ale pouze její změnu. Existuje několik zapojení můstků, nejjednodušší a nejčastější je tzv. Wheatstonův můstek (most). Můstek vynalezl roku 1833 britský vědec a matematik Samuel Hunter Christie, ale zdokonalil jej a popularizoval až roku 1843 britský fyzik a vynálezce Sir Charles Wheatstone.

5.6.1 ZÁKLADNÍ POPIS WHEATSTONOVA MOSTU



Obr. 5.27: Zapojení Wheatstonova můstku

Kde U_n je napájecí napětí a U_v je výstupní napětí.

Výstupní napětí U_v (rozdíl napětí mezi body 1 a 4) je dáno vztahem 5.18.

$$U_v = U_n \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2) \cdot (R_3 + R_4)} \quad 5.18$$

Ze vztahu 5.18 je patrné, že U_v je rovno 0, pokud budou platit podmínky uvedené ve vztahu 5.19.

$$R_1 R_3 = R_2 R_4 \text{ nebo } R_1 = R_2 = R_3 = R_4 \quad 5.19$$

Je-li podmínka splněna, nachází se můstek ve vyváženém stavu. Změna výstupního napětí ΔU_v je potom způsobena změnou odporů R_1, R_2, R_3, R_4 a $\Delta R_1, \Delta R_2, \Delta R_3, \Delta R_4$. Taková změna odporu tenzometru vzniká jeho délkovým přetvořením nebo změnou teploty. Pak je změna U_v v závislosti na změnách odporů v můstku dána vztahem 5.20.

$$\frac{\Delta U_v}{U_n} = \frac{r}{(1+r)^2} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) (1 - \eta) \quad 5.20$$

Kde r je dáno vztahem 5.21 a η (nelineární člen) je dán vztahem 5.22.

$$r = \frac{R_2}{R_1} = \frac{R_3}{R_4} \quad 5.21$$

$$\eta = \frac{1}{\frac{1+r}{\frac{\Delta R_1}{R_1} + \frac{\Delta R_4}{R_4} + r \left(\frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} \right)}} \quad 5.22$$

Ze vztahu 5.20 vyplývá, že nelinearita bude pro $r=0$ nulová, pokud $\Delta R_1 = -\Delta R_2$ při $\Delta R_3 = -\Delta R_4 = 0$, nebo $\Delta R_3 = -\Delta R_4$ při $\Delta R_1 = -\Delta R_2 = 0$, případně pokud $\Delta R_1 = -\Delta R_2$ a zároveň $\Delta R_3 = \Delta R_4$.

Tento výsledek je důležitý pro praxi a značí, že můstek se chová lineárně, pokud zapojíme jako aktivní stejné tenzometry na místech odporů R_1 a R_2 nebo na místech R_3 a R_4 (půlmostové zapojení) a dosáhneme v dané dvojici stejné změny odporu s opačným znaménkem. Nelinearita mizí i v případě, že na místech všech čtyř odporů zapojíme aktivní tenzometry stejného odporu podle předchozích pravidel (plnomostové zapojení). Při užití jednoho aktivního tenzometru se chová můstek do jisté míry nelineárně. Pokud je v tomto případě relativní změna odporu aktivního tenzometru $\Delta R/R < 0,02$ (hodnota, odpovídající cca 10 000 $\mu\text{m/m}$, která při běžných měřeních není dosahována), nepřesáhne nelinearita v celém rozsahu 1%. V praxi se vzhledem k nepodstatnému vlivu nelinearity používá vztah 5.20 ve zjednodušeném tvaru, který je označován jako základní rovnice pro určení přetvoření a je dán vztahem 5.23.

$$\frac{\Delta U_V}{U_N} = \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \quad 5.23$$

Po dosazení délkových přetvoření tenzometrů dostáváme vztah 5.24.

$$\frac{\Delta U_V}{U_N} = \frac{k}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \quad 5.24$$

Vztah 5.24 se dá upravit do tvaru 5.25, který udává výsledné přetvoření.

$$\varepsilon_V = \varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4 \quad 5.25$$

Ze vztahu 5.24 a 5.25 pak plyne realizované zapojení (měřicí zařízení), které je dáno vztahem 5.26.

$$\frac{\Delta U_V}{U_N} = \frac{k}{4} \varepsilon_V \text{ a nebo } \frac{\Delta U_V}{U_N} = \frac{k_z}{4} \varepsilon_i \quad 5.26$$

Z uvedených vztahů 5.26 pak vyplývá vztah 5.27 pro indikované přetvoření ε_i . K_z uvažujeme obvykle 2.

$$\varepsilon_i = 2 \cdot \frac{\Delta U_V}{U_N} \quad 5.27$$

Přepočet změny napětí na deformaci je pak například uveden ve vztahu 5.28.

$$\frac{\Delta U_V}{U_N} = \frac{1mV}{V} = 10^{-3} \quad je \quad \varepsilon_i = 2 \cdot 10^{-3} \frac{m}{m} = 2000 \frac{\mu m}{m} \quad 5.28$$

[4]

5.6.2 ZPŮSOBY ZAPOJENÍ TENZOMETRŮ DO MŮSTKU

Mezi základní mechanické namáhání patří tah/tlak, ohyb, smyk a krut. Pro tato namáhání se používají různá zapojení:

- a) Zapojení do $\frac{1}{4}$ mostu
- b) Zapojení do dvou $\frac{1}{4}$ mostů
- c) Zapojení do $\frac{1}{2}$ mostu
- d) Zapojení do plného mostu

Každé ze zmíněných zapojení má svoje výhody i nevýhody. Před měřením je zapotřebí zvolit takové zapojení, které bude nejvíce vyhovovat měřené problematice. A to zejména tak, aby nežádoucí vlivy od zapojení co nejméně negativně ovlivňovaly měření.

Vzhledem k tomu, že tato podkapitola nesouvisí přímo se zadáním diplomové práce, nebude dále více rozebírána. Podrobné popsání je uvedeno zejména v literatuře [4].

6 MĚŘENÍ TLAKU

Měření tlaku patří k velmi často používaným měřením. A to ať už v průmyslové praxi, anebo v laboratorních podmínkách. V průmyslové praxi, a to zejména ve strojírenských a technologických provozech, se používá měření tlaků hlavně pro změření tlaku oleje v různých hydraulických systémech a tlaku vzduchu v tlakových nádobách. Dále jsou tlakové snímače hojně využívány jako bezpečnostní prvky tlakových zařízení a při řízení a regulaci.

Na začátku této kapitoly jsou stručně popsány základní definice a dělení snímačů, dále je pak část, která popisuje deformační tlakoměry. Větší pozornost je pak věnována moderním snímačům tlaku s elektrickým výstupem, které jsou hojně využívány v různých typech měření. Na konci kapitoly je zmíněna problematika instalace (zabudování) a kalibrace tlakových snímačů.

Kapitola svým rozsahem nemůže postihnout celou šíři měření tlaku ani škálu nejrozumnějších typů měřicích přístrojů a snímačů. Cílem je pouze základní seznámení s problematikou, a to zejména s kapitolami, které se týkají měření tlaku v energetice. Problematika je dále popsána v odborné literatuře. Hlavně pak v sérii článků v odborném časopise AUTOMA č. 2,7,10,11 ročník 2007 „Snímače tlaku – principy, vlastnosti a použití“ od Karla Kadlece z Ústavu fyziky a měřicí techniky VŠCHT Prahy.

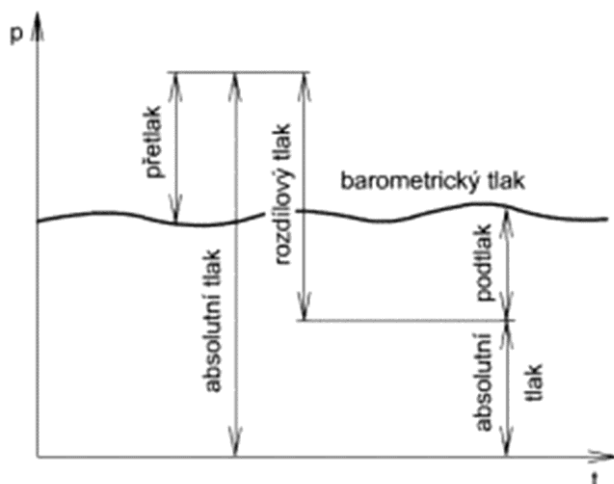
6.1 TLAK

Tlak je definován silou působící kolmo na jednotku plochy S a je dán vztahem 6.1. [53]

$$p = \frac{F}{S} \quad 6.1$$

Jednotkou tlaku je pascal (Pa). Pascal je tlak, který vyvolává sílu jednoho newtonu rovnoměrně rozloženým na rovinné ploše s obsahem jednoho čtverečního metru, kolmým ke směru síly. Pro praktické použití v technické praxi je jednotka 1 Pa velmi malá, proto používáme jednotky násobné kPa, MPa. [53]

Tlak můžeme udávat vůči dvěma vztažným hodnotám a to jako absolutní tlak (vztažený k absolutní tlakové nule) a tlak relativní (vztažený k atmosférickému tlaku). Podle tohoto kritéria můžeme hovořit o rozdělení tlaků.



Základní rozdělení tlaků:

- a) Absolutní tlak
 - b) Přetlak
 - c) Podtlak
 - d) Rozdílový (diferenční) tlak
 - e) Barometrický (atmosférický) tlak
 - f) Vakuum
- [5] [52]

Obr. 6.1: Grafické znázornění tlakových oblastí [52]

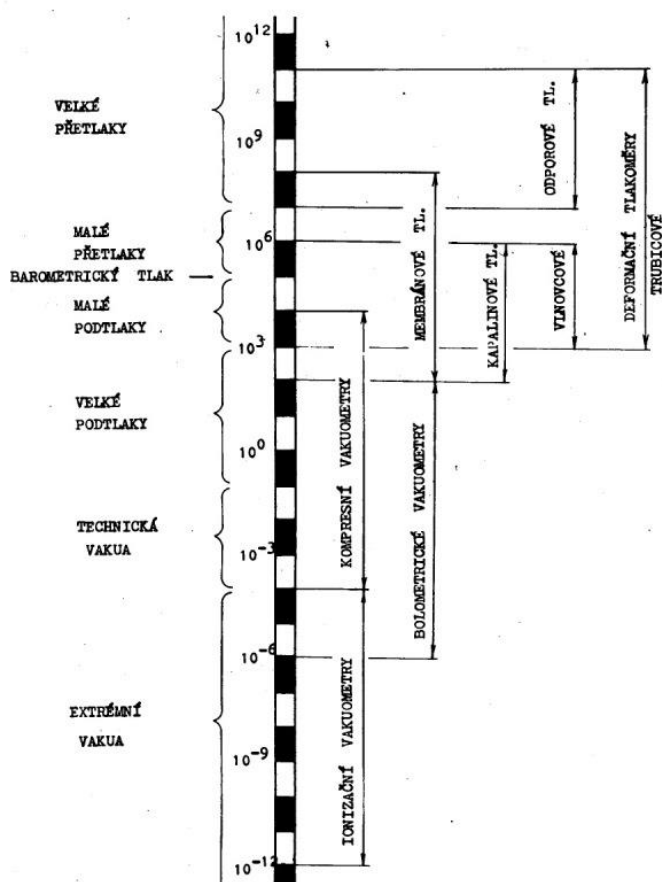
6.2 ROZDĚLENÍ SNÍMAČŮ TLAKŮ (TLAKOMĚŘŮ)

V této kapitole bude uvedeno rozdělení tlakoměrů podle čtyř základních kritérií. Dělení dle velikosti měřeného tlaku (dle použití) a funkčního principu, metody měření a stupně přesnosti. Jednotlivé tlakoměry nebudou dále rozebrány, kromě některých vybraných typů deformačních snímačů, které jsou nejvíce rozšířené v průmyslové praxi. Ostatní snímače jsou rozebrány v odborné literatuře, zejména pak v [5].

DĚLENÍ DLE VELIKOSTI MĚŘENÉHO TLAKU A PODLE POUŽITÍ

- a) Snímače vakua (vakuometry a ultravakuometry)
- b) Snímače podtlaku i přetlaku (manovakuometry)
- c) Snímače malých podtlaků (tahoměry)
- d) Snímače přetlaků (manometry)
- e) Diferenční snímače (k měření tlakových rozdílů)
- f) Snímače pro měření tlaku ovzduší (barometry)

[5] [53]



Obr. 6.2: Měřicí rozsahy tlakoměrů [55]

DĚLENÍ DLE DEFINIČNÍCH VZTAHŮ A POUŽITÉHO FYZIKÁLNÍHO PRINCIPU

- Tlakoměry kapalinové**
Měřítkem tlaku je výška sloupce tlakoměrné kapaliny v přístroji. Patří sem U-trubicový tlakoměr, nádobkový tlakoměr a mikromanometr se sklonnou trubicí. Zvláštní skupinu pak tvoří kompresní vakuometry a prstencové tlakoměry.
- Tlakoměry zvonové**
Etalonové přístroje ke kalibraci nízkotlakých snímačů. Měřítkem tlaku je zdvih zvonu v kapalině.
- Tlakoměry pístové**
Etalonové přístroje ke kalibraci vysokotlakých snímačů. Měřítko tlaku je velikost závaží na pístu známého průřezu.
- Tlakoměry deformační**
Nejčastěji používané snímače. Měřítkem tlaku je deformace pružného prvku. Rozdělují se podle tlakoměrného prvku na snímače trubicové, membránové, krabicové a vlnkové a podle způsobu snímání deformace pružného prvku na pizoresistivní, tenzometrické, indukční, indukčnostní, kapacitní apod.

e) Tlakoměry elektrické

Využívají tlakové závislosti elektrické veličiny. Měřítkem tlaku je např. změna elektrického odporu vodiče (vysokotlaké tlakoměry, odporové manometry, bolometrické vakuometry) nebo jiné elektrické veličiny (ionizační vakuometry). [5] [53] [55]

DĚLENÍ DLE PRIMÁRNÍ A SEKUNDÁRNÍ METODY MĚŘENÍ

a) Primární metoda měření

Tyto přístroje měří tlak přímo na principu měření základních veličin (délka, hmotnost) a nepotřebují kalibraci. Do této kategorie spadají např. kapalinové tlakoměry a pístové tlakoměry.

b) Sekundární metoda měření

Měří tlak nepřímo a je nutné ho kalibrovat na základě primární metody. Mezi tyto tlakoměry patří např. prstencový tlakoměr a všechny deformační a elektrické tlakoměry.

DĚLENÍ DLE STUPNĚ PŘESNOSTI

a) Provozní

b) Kontrolní (o třídu přesnější než provozní)

c) Laboratorní (bývají nejpřesnější)

[5] [13]

6.3 DEFORMAČNÍ TLAKOMĚRY

Nejrozšířenější tlakové snímače jsou trubicové a membránové. Deformační prvky se zhotovují z uhlíkových a niklových ocelí, z mosazi, z fosforového a beryliového bronzů a dalších vhodných slitin.

Tento typ (provedení) tlakoměru byl v mnoha oblastech použití nahrazen modernějšími typy snímačů. Avšak pro některé své přednosti, jako jsou jednoduchost, spolehlivost, robustnost, nezávislost na napájení, v mechanickém provedení prakticky absolutní odolnost proti elektromagnetickému rušení a hlavně nízkou cenou, si i dnes udržuje důležité místo v oblasti měření tlaku zejména v náročných podmínkách (nízké či vysoké teploty, špatná udržitelnost, pravidelná údržba a servis, otřesy, atp.).

Nedostatkem je elastické dopružování a případné trvalé deformace měřicího prvku během provozu, zejména při dlouhodobém přetížení. Dalším nedostatkem je i vliv okolní teploty, která ovlivňuje modul pružnosti materiálu deformačního prvku. [52][53][55]

6.3.1 TLAKOMĚRY S ODPOROVÝMI TENZOMETRY

Princip je založený na deformování tlakoměrné membrány, popř. krabice. Ta je opatřena tenzometrickým můstkem (úplným, nebo polovičním) z kovových nebo polovodičových tenzometrů. Ve většině případů jsou tenzometry přímo umístěny na deformačním členu. Nevýhodou snímačů tlaku využívajících tenzometrů je především nízká úroveň výstupního signálu ($\mu\text{V/V}$ až mV/V). Často jsou mylně označovány jako „tenzometrické tlakoměry“. [52] [53] Více o principu v kapitole 5.3.

6.3.2 TLAKOMĚRY PIEZOELEKTRICKÉ A PIEZOREZISTIVNÍ

U těchto snímačů se využívá piezoelektrický jev, který se vyznačuje tím, že při působení na materiál s piezoelektrickými vlastnostmi se generuje náboj úměrný tlaku. Jako citlivý materiál se používají především piezokeramika a křemen. Čidlo tlaku je vytvořeno spojením několika disků.

Piezoelektrický snímač tlaku se vyznačuje malými rozměry. Může pracovat při vysokých teplotách (až 500°C). Má velmi příznivé dynamické vlastnosti, jeho odezva činí řádově několik mikrosekund. Jsou vhodné pro měření časově proměnlivých tlaků a rychlých dějů, avšak nemohou prakticky měřit statický tlak. Horní hranicí tohoto typu je 100 MPa.

Piezorezistivní snímač tlaku je senzor, který využívá piezorezistivní materiál místo piezoelektrického krystalu a jeho prostřednictvím převádí tlak na změnu odporu. Piezorezistivní tlakoměry mají tu výhodu oproti piezoelektrickým, že mohou měřit i statický tlak.

Na piezorezistivním principu fungují např. snímače tlaku firmy BD Sensors - DMP 331/333.



[46] [53] [58]

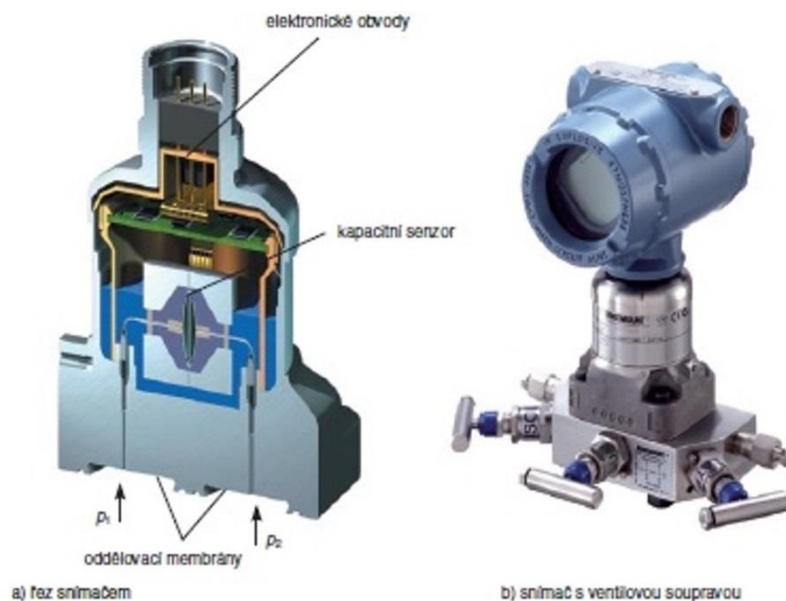
Obr. 6.3: Tlakový snímač BD Sensors DMP 333 [46]

6.3.3 SNÍMAČE S KAPACITNÍMI ČIDLY

U těchto snímačů je využíváno pro měření tlaku kapacitní čidlo. Deformační člen (kovový, polovodičový, keramický) vytváří alespoň jednu elektrodu kapacitního čidla. Nejčastěji používaným deformačním členem je membrána. Kapacitní čidlo je konstrukčně velmi jednoduché. Jedna elektroda kondenzátoru je tvořena membránou, jejíž poloha se mění vlivem tlaku. Změna vzdálenosti elektrod kondenzátoru se projeví změnou jeho kapacity.

Pro dnešní kapacitní senzory tlaku vyráběné mikroelektromechanickými postupy jsou charakteristické miniaturní rozměry a vysoká kvalita čidel. Výhodami těchto snímačů jsou jednoduché a kompaktní odolné konstrukce. Mají minimální drift (posuv nuly) a minimální změnu citlivosti na teplotou. Nevýhodou je citlivost na parazitní kapacity přívodů.

Kapacitní čidla jsou hojně využívána pro snímače tlakové difference. Používají se k měření přetlaku v rozsazích 0 až 70 MPa a k měření rozdílů tlaků ± 14 MPa.



Obr. 6.4: Kapacitní snímač tlaku Rosemount 3051S

[53] [56]

6.3.4 SNÍMAČE OPTICKÉ

Do této skupiny můžeme zařadit například světlovodné snímače tlaku. Pro jejich funkci se využívá vlastností světla (nosiči informace jsou fotony). K jejich pozitivním vlastnostem patří velká citlivost, linearita, odolnost proti rušení a malá hmotnost. Nevýhodou jsou náročnější konstrukce a vyšší cena. Mohou pracovat ve výbušném prostředí a v zařízeních s extrémním rušením elektromagnetickým polem.

Optické snímače využívají jak volný světelný svazek (paprsky), tak v poslední době stále častěji optická vlákna (světlovody). Dělí se na optické vláknové snímače vlastní (vlákno je součástí snímače) a nevlastní (vlákno funguje pouze jako transportní prostředí).

[53] [54]

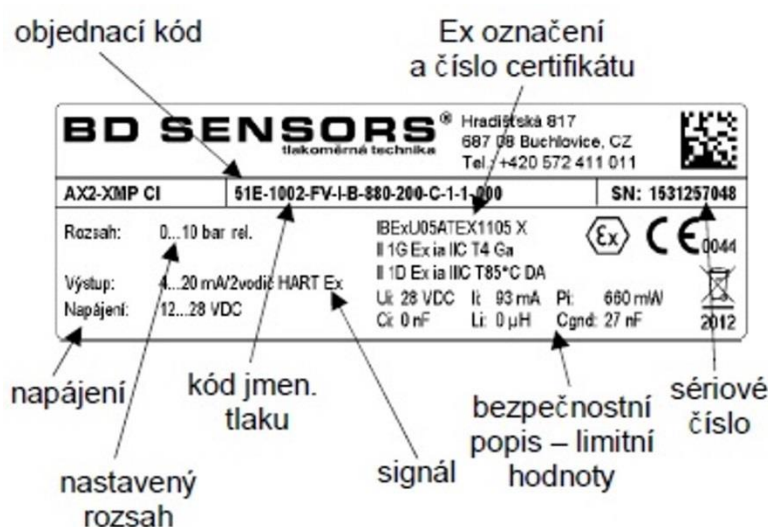
6.4 TLAKOMĚRY S ELEKTRICKÝM VÝSTUPEM

Současná měření vyžadují snímače, které poskytují výstupní signál vhodný k dálkovému přenosu a následnému zpracování informací. Principiálně jsou založené na využití některého z deformačních tlakoměrných prvků (nejčastěji membrána). Snímače jsou založeny na principu, kdy je mechanická změna převedena pomocí elektrického a nebo elektronického čidla na elektrický signál (mechanicko-elektrický převodník). Elektronická čidla využívají zejména odporového (potenciometry, tenzometry) a kondenzátorového principu. Dále se pak využívají indukčnostní, piezoelektrické a polovodičové prvky. Někdy jsou mylně označovány jako elektrické tlakoměry. [55] [57]

Každé měření tlaku je specifické a podle toho se musí přistupovat i k výběru tlakového snímače. Na trhu se vyskytují snímače od různých výrobců a každý výrobce nabízí snímače se spoustou technických parametrů, které je možné libovolně volit. Mezi nejdůležitější technické parametry patří:

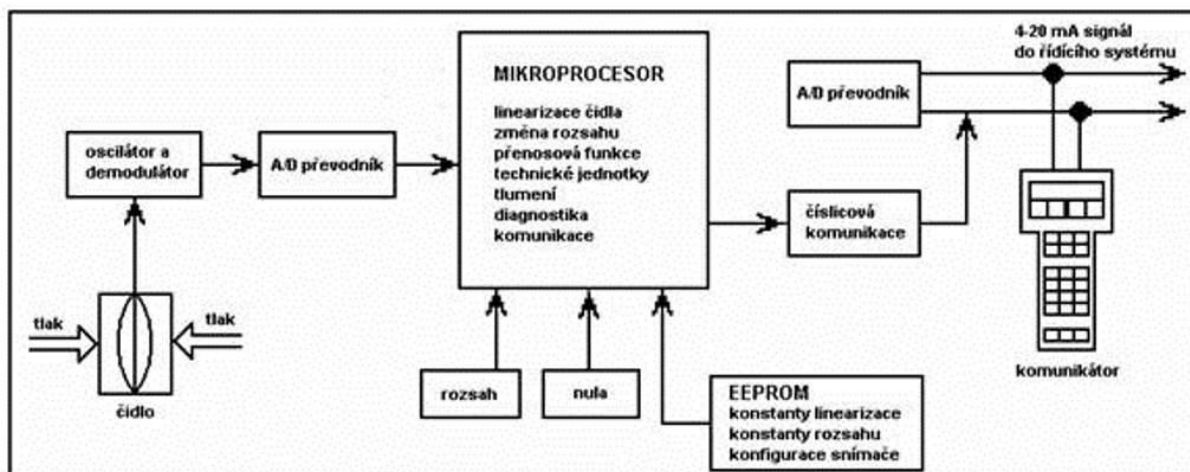
- a) Výrobce
- b) Použití
- c) Rozsah a přetížitelnost
- d) Provedení
- e) Typ měření
- f) Výstup
- g) Mechanické a elektrické připojení
- h) Napájení
- i) Použitý materiál

Všechny parametry jsou dostupné v katalogových listech jednotlivých výrobců. Na všech snímačích je nalepený nebo vyjiskřený štítek, který obsahuje základní údaje (parametry) o snímači.



Obr. 6.5: Ukázka štítku tlakového snímače [46]

V současné době se stále více uplatňují tzv. inteligentní snímače (inteligentní převodníky tlaku), které jsou známější pod označením SMART (chytrý). Tyto snímače v sobě sdružují velké množství funkcí. Obsahují mikroprocesor a kromě analogových i číslicových převodníků jsou doplněny rovněž příslušnou pamětí, ve které mohou být uloženy korekční a kalibrační tabulky. Snímač tlaku bývá rovněž doplněn měřením a korekcí vlivů teploty, popř. dalších parametrů prostředí, takže výsledky lze velmi výrazně zpřesnit. Tlakový snímač SMART zpravidla umožňuje vybrat mezi režimem měření absolutního tlaku, přetlaku či tlakové difference. Dovoluje plynule nastavit nulu a měnit rozsah. Inteligentní snímače měří nejen příslušnou fyzikální veličinu, ale mohou podle jejího časového průběhu, velikosti a nastavení programu vestavěného mikroprocesoru regulovat funkci zařízení závislou na jejím průběhu, signalizovat překročení nastavených mezí atp. Přitom veškeré operace nejsou realizovány mechanicky, ale programově buď pomocí speciálního softwaru prostřednictvím nadřazeného počítače, nebo pomocí speciálního ručního komunikátoru. Snímače SMART jsou spíše vhodné pro průmyslové prostředí než jako přístroje pro měření tlaku. SMART přístroje jsou výhodné pro svou přesnost, flexibilitu, a univerzálnost. [52] [55] [59]



Obr. 6.6: Blokové schéma snímače SMART [52]

VÝROBCE

Mezi hlavní světové výrobce tlakových přístrojů patří: EMERSON (Rosemount), Siemens (SITRANS), BD Sensors Buchlovce, YOKOGAWA, Endress + Hauser, VTS Zlín, Datacon a další.

POUŽITÍ

Použití se určuje na základě měřeného média (kapaliny, plyny, pára) a dle oblasti použití. Dělíme je zejména do dvou hlavních směrů, a to pro laboratorní měření a měření v průmyslu (potravinářský, procesní, ropný, plynárenský, strojírenství, automobilní, medicínský, papírenský atd.).

ROZSAH A PŘETÍŽITELNOST

Žádný typ tlakoměru nemůže pracovat v celém rozsahu měřeného tlaku, který bývá od 10^{-12} do 10^{12} Pa. Rozsahy tlakoměrů se liší dle konkrétních typových řad snímačů, většinou je rozsah volitelný pro jednu typovou řadu snímače. Přetížitelnost je velice individuální, ale většinou bývá do 130 až 200% rozsahu. Ve výjimečných případech může dosáhnout až 1000% rozsahu. Přetížitelnost se udává krátkodobá a dlouhodobá. Krátkodobá bývá větší.

TYP MĚŘENÍ

U snímačů tlaku se setkáváme s rozlišením pro statické a dynamické měření. Snímače pro dynamická měření požadují vyšší stabilitu a rychlost odezvy.

VÝSTUP

Výstupy lze rozdělit na dvě základní skupiny. Na výstup digitální, který pak posílá signály například přes sběrnici Profibus a na výstupy analogové. Analogové pak dělíme na pasivní (proudový), který je 4 až 20 mA a 0 až 20 mA (0 až 20 mA se používá výjimečně) a aktivní (napěťový), který bývá 0 až 10/5/1Vss a nebo 1 až 6Vss. Výstup 4 až 20 mA je odolný proti elektrickému rušení a není ovlivňován odporem vodičů. Je vhodný pro aplikace kde se přenáší signál na velké vzdálenosti (maximálně 300 m).

PROVEDENÍ

V praxi se používají snímače, které jsou dle provedení rozděleny do třech skupin, a to na snímače relativního, absolutního a diferenčního tlaku.



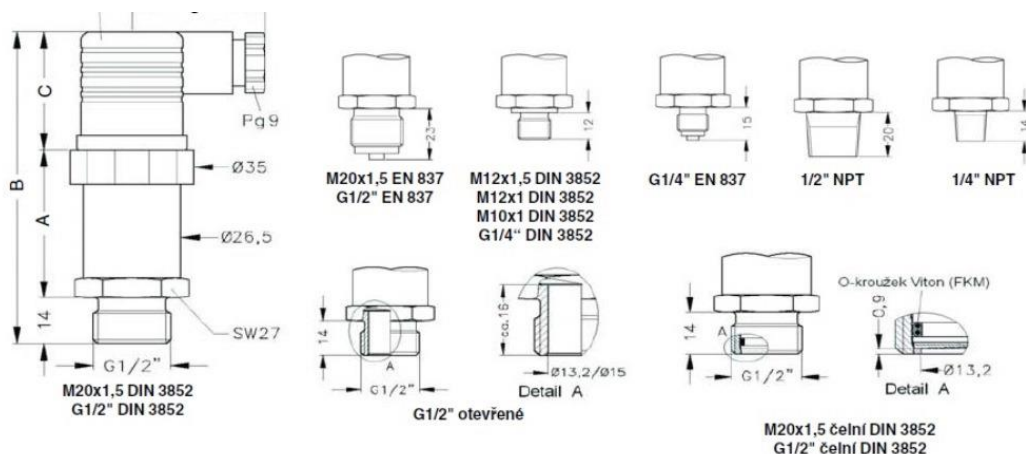
Obr. 6.7: Snímač absolutního a relativního tlaku JSP-DMP 331/333 [45]



Obr. 6.8: Diferenční snímač tlaku Rosemount 2051CD PK s ventilovou soupravou [45]

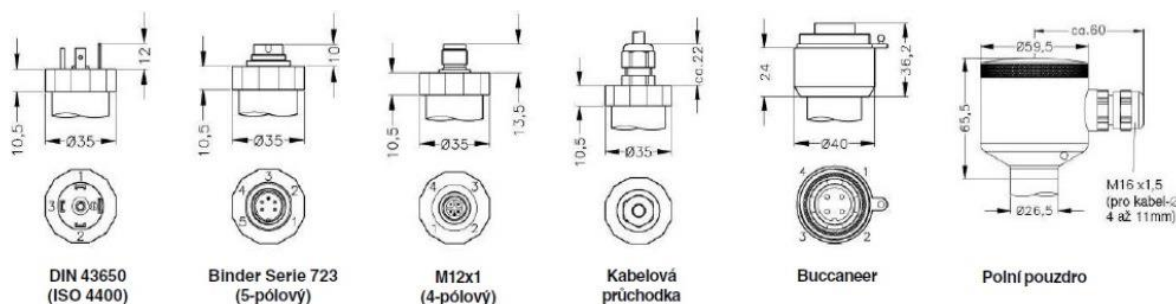
MECHANICKÉ A ELEKTRICKÉ PŘIPOJENÍ

Většina tlakových snímačů se mechanicky připojuje pomocí připojovacích standardů (vnějších a vnitřních závitů). Snímače tlakové difference používají ventilové soupravy, které bývají jednocestné, dvojcestné, třícestné a pěticestné.



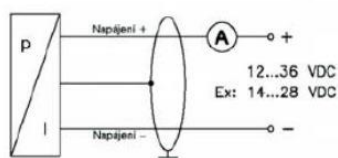
Obr. 6.9: Ukázka připojovacích možností tlakových snímačů [45]

Elektrické připojení je také většinou standardizované, používají se konektory. Pro napájení a přenos signálu se používá dvou vodičové a třívodičové připojení.

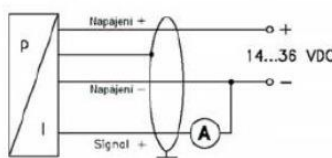


Obr. 6.10: Ukázka vybraných konektorů [45]

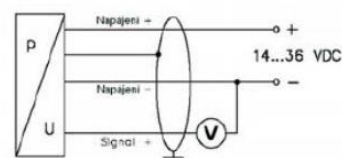
Dvou vodičové připojení
(proud):



Třívodičové připojení
(proud):



Třívodičové připojení
(napětí):



Obr. 6.11: Ukázka dvou a třívodičového zapojení [45]

6.5 KALIBRACE TLAKOVÝCH SNÍMAČŮ

Kalibrace je soubor úkonů, která dává za určených podmínek závislost mezi hodnotami indikovanými měřicím přístrojem a mezi hodnotou realizovaným referenčním etalonem. Provádí se za účelem ověřování a kontroly správné funkčnosti měřicího přístroje. Při kalibraci je dobré zkontrolovat celý měřicí řetězec (čidlo, převodníky, vyhodnocovací jednotky atd.). U kalibrace tlakových snímačů se používají dvě metody, a to absolutní a srovnávací. Všechny tlakoměry by se měly pravidelně kontrolovat. Platnost kalibrace si určuje uživatel tlakoměru sám podle potřeby (pokud nejde o úředně ověřená měřidla). Tlakoměry se kalibrují podle příslušných předpisů a souvisejících norem, které určují rozsah a způsob vykonání jednotlivých zkoušek a zjišťování metrologických parametrů. Při kontrole kalibrace se kontrolovaný přístroj postupně zatěžuje tlakem rostoucím až na maximální hodnotu a následně se tlak postupně zmenšuje na hodnotu odpovídající nule. Zkušební body by měly být rovnoměrně rozděleny v celém rozsahu měření. Kalibrace by měla probíhat minimálně v deseti bodech u přístrojů s větší třídou přesnosti. U přístrojů s menší třídou přesnosti stačí pět kalibračních bodů. Pro správnou kontrolu opakovatelnosti, hystereze a dalších vlastností by se měl cyklus zatěžování a odlehčování opakovat nejméně 2x. Výstupem z každé kalibrace je tzv. kalibrační (zkušební, ověřovací) protokol, který by měl obsahovat následující informace: specifikaci ověřovaných přístrojů, způsob ověřování, metrologickou návaznost, specifikaci etalonu, naměřené hodnoty a jejich vyhodnocení (tabulky, grafy) chyby a nejistoty měření. Kalibrace by se měla provádět na přístrojích, které jsou minimálně o dvě třídy přesnější než kontrolovaný tlakoměr. Většinou je výsledkem kalibrace závislost tlaku na proudu nebo napětí.

Primární etalonáž tlaku v rozsahu 10^{-4} Pa až 10^9 Pa zajišťuje ČMI, respektive primární laboratoř tlaku v Brně.

Pro kalibraci je vhodné využít buď přímo laboratoře ČMI, nebo některé akreditované kalibrační laboratoře (JSP Nová paka, BD Sensors Buchlovice, JE Dukovany). Pokud je nutné provádět kalibraci operativně nebo v terénu, je možné využít přenosný kalibrátor, např. Beamex (MC6, MC5, MC4) a nebo Ametec (Tecra). [5] [46] [52] [53] [59]



Obr. 6.12: Multifunkční kalibrátor Beamex MC6 [47]

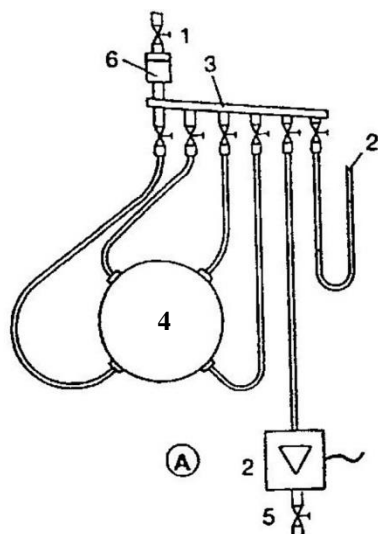


Obr. 6.13: Ruční zdroj tlaku (pumpa)[47]

6.6 INSTALACE TLAKOVÝCH SNÍMAČŮ

Při měření tlaku, podtlaku nebo tlakového rozdílu je nutno volit vhodné místo odběru a správně volit provedení tlakoměru, aby měřený tlak nebyl zkreslen okrajovými vlivy. Snímače tlaku se umisťují co nejblíže k potrubí (snímač musí být umístěn v takové vzdálenosti od potrubí, aby nebyl ovlivněn teplotou potrubí). Avšak odběrová místa musí být dostatečně vzdálena od rušivého vlivu armatur (ventily, kolena apod.). Obvykle se udává vzdálenost 10D před a 5D za snímačem. Stěna potrubí v místě odběru musí být hladká a odběrové místo nesmí zasahovat dovnitř potrubí. Aby se zamezilo zanášení odběru nečistotami nebo kondenzátem, instalují se snímače nad potrubí (pro měření tlaku plynu) a do boku potrubí (pro měření kapaliny). Při měření je vhodné mezi potrubí a snímač vkládat odvzdušňovací ventily (kohouty) a to z důvodu, že během měření mohou v médiu vznikat parazitní složky (vzduch, voda, atd.). Pootevřením ventilu se odstraní nežádoucí složky média. Dále pak ventily slouží pro uzavření přívodu média do tlakoměru (servisní účely apod.). Pokud se u měření vyskytují vysoké pulzace, je možné použít tlumicí zařízení (jenom v případě že se nejedná o dynamické měření).

V některých případech mohou mít odběry tlaků sběrnou trubku nebo sběrné okružní potrubí. Tyto odběry nejsou vhodné pro dynamické měření.

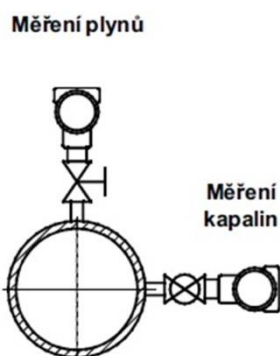


- 1 – Odvzdušnění k sběrné trubce
- 2 – Měřidlo tlaku
- 3 – Sběrná trubka
- 4 - Potrubí
- 5 – Odkalování
- 6 – Sběrná odvzdušňovací nádoba

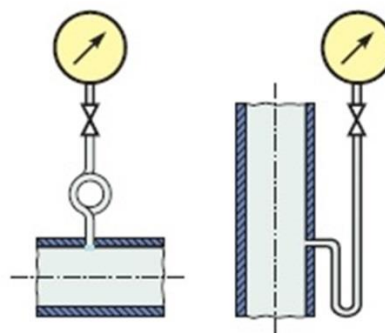
Obr. 6.14: Jednotlivé spojení ke sběrné trubce [13]

Při měření tlaku přehřáté páry se musí zajistit, aby se pára nedostala do tlakoměru, který by se poškodil. Z toho důvodu se snímač připojuje pomocí kondenzační smyčky nebo kondenzační nádoby.

Při měření tlaku agresivního prostředí je nutno měřicí tlakoměr chránit proti korozi. Nejspolehlivější ochranou je vyrobení měřicího systému z nekorozního materiálu, použití oddělovacích nádobek naplněných oddělovací kapalinou, nebo použití membránového oddělovače.



Obr. 6.15: Umístění snímačů při měření kapalin a plynů [53]



Obr. 6.16: Kondenzační smyčky [59]

Při měření na dálku se propojuje tlakoměr s místem odběru signálním potrubím (nevhodný název impulzní potrubí). Doporučuje se potrubí o světlosti 6 až 10 mm a maximální délky do 50 metrů. Signální potrubí by mělo být bez ostrých ohybů, položeno bez možnosti usazování kondenzátu nebo vytváření bublin, musí mít spád s instalovanými odkalovacími či odvzdušňovacími ventily a celkově nesmí zkreslovat měřený tlak.

[13] [52] [53] [59]

7 NEJISTOTY MĚŘENÍ

Nejistota měření je parametr související s výsledkem měření a charakterizující rozptyl hodnot, které je možno racionálně přiřadit k měřené veličině.

Nejistota měření může obecně zahrnovat více složek. Některé se mohou určit statistickým vyhodnocením série měření, jiné se dají určit na základě zkušeností z předpokládaného rozdělení nebo z jiných informací.

Vyjádření výsledku měření je jen tehdy úplné, jestliže obsahuje hodnotu přiřazenou měřené veličině a nejistotu měření spojenou s touto hodnotou.

Při vyhodnocování měření je důležité rozlišovat, zda se opakované měření uskutečnilo za stejných nebo rozdílných podmínek.

Při výpočtu nejistoty měření se musí brát na zřetel, že se rozlišuje výpočet nejistoty pro přímé a nepřímé metody měření.

a) Přímá metoda měření

Spočívá v přímém odečtu hodnot měřené veličiny na měřicím přístroji, aniž by se musel provádět výpočet podle dané závislosti měřené veličiny na veličinách jiného druhu, které bychom jinak měřili. Do této skupiny metod se zahrnuje i použití grafů a tabulek, pomocí nichž se převede údaj přístroje na hodnotu určené veličiny.

b) Nepřímá metoda měření

Potřebuje k určení hodnoty zjišťované veličiny výpočtové vztahy (funkční závislosti) vázané na jednotlivé měřené veličiny.

Standartní nejistotu je možné vyjádřit v hodnotách měřené veličiny. Ta je pak označovaná jako absolutní standartní nejistota, anebo jako poměr absolutní nejistoty k hodnotě příslušné veličiny, kterou pak označujeme jako relativní standartní nejistotu. (je zde vidět zjevná analogie s absolutní a relativní chybou).

Nejistota se dělí na standartní a rozšířenou. Standartní nejistota se označuje u . Podle způsobu získání se dělí na standartní nejistotu stanovenou metodou A a metodou B. Nejistoty určené oběma metodami jsou rovnocenné. Sloučením těchto nejistot vznikne kombinovaná standartní metoda.

Standartní nejistota vymezuje rozsah hodnot $\langle -u, +u \rangle$ kolem udávané hodnoty. Při uvádění hodnoty za rovnítkem (=) se píše znaménko. Jestliže se připojuje k hodnotě výsledku, dává se před její číselnou hodnotu znaménko \pm .

[4] [5] [8] [60]

7.1 ZDROJE NEJISTOT MĚŘENÍ

Jako zdroje nejistot lze označit veškeré jevy, které nějakým způsobem mohou ovlivnit neurčitost jednoznačného stanovení výsledku měření a tím vzdalují naměřenou hodnotu od hodnoty skutečné. V praxi existuje mnoho možných nejistot měření, mezi které patří:

- nedokonalá či neúplná definice měřené veličiny
- nevhodný výběr přístroje (rozlišovací schopnost aj.)
- nevhodný (nereprezentativní) výběr vzorků měření
- nevhodný postup při měření
- zjednodušení (zaokrouhlení) konstant a převzatých hodnot
- linearizace, aproximace, interpolace anebo extrapolace při vyhodnocení
- neznámé nebo nekompenzované vlivy prostředí
- nedodržení shodných podmínek při opakovaných měřeních
- subjektivní vlivy obsluhy
- nepřesnost etalonů a referenčních materiálů

Zdroje nejistot nemusí být nutně nezávislé. Při určování nejistot vycházíme z teorie pravděpodobnosti a matematické statistiky. Předpokládá se přitom, že měřené hodnoty a chyby mají určité rozdělení pravděpodobnosti. Potom i výsledek měření má určité rozdělení pravděpodobnosti. [4] [8] [60]

7.2 ZÁSADY PRO UDÁVÁNÍ ODHADŮ A JEJICH NEJISTOT

Po udávání nejistot měření je potřeba dodržovat následující zásady:

1. Výpočet nejistot je neoddelitelnou součástí zpracování a vyhodnocení naměřených údajů. Údaj nejistoty je součástí výsledků měření. Výsledek měření se skládá z odhadu hodnoty měřené veličiny a příslušné nejistoty.
2. U každého údaje nejistoty musí být zřejmé, zda se jedná o standartní nebo rozšířenou nejistotu.
3. U údaje rozšířené nejistoty musí být uveden koeficient pokrytí případně metoda jeho stanovení.
4. Číselná hodnota nejistoty měření se uvádí maximálně na dvě platné číslice.

Při vyhodnocení měření je potřeba doplnit výsledky měření o další informace. Někdy se informace píšou do bilanční tabulky.

- Model měření (pokud není zřejmý z textu)
- Uvažované zdroje nejistot z jednotlivých zdrojů
- Způsob určení nejistot z jednotlivých zdrojů
- Nejistoty jednotlivých zdrojů
- Počet naměřených údajů, z nichž jsou počítány nejistoty metodou A

Rozsah uváděných informací závisí na charakteru dokumentu, v němž se udávají nejistoty. [4] [8]

7.3 STANDARTNÍ NEJISTOTA STANOVENÁ METODOU A

Charakteristickým znakem nejistoty vyhodnocené metodou A je to, že s rostoucím počtem měření jejich hodnoty klesají. Příčiny nejistot se všeobecně považují za neznámé. Charakter nejistot stanovených metodou A je více univerzální, protože vyhodnotit skupinu údajů měření je třeba ve všech oborech měření. Vyhodnocení standartní nejistoty metodou A se provádí statistickým zpracováním výsledků opakovaných přímých měření. Nejčastěji se předpokládá, že naměřené hodnoty získáme nezávislým měřením za stejných podmínek měření. Podmínkou vyhodnocení metodou A je realizace vícero opakovaných měření.

7.3.1 URČENÍ PŘI PŘÍMÉ METODĚ MĚŘENÍ

Standartní nejista určená metodou A je rovna směrodatné odchylce aritmetického průměru.

$$u_{Ax} = S_{\bar{x}} = \frac{S_x}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad 7.1$$

Kde \bar{x} je odhad naměřené veličiny, který vychází z předpokladu, že naměřené údaje jsou realizací n nezávislých stejně přesných měření jedné veličiny.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad 7.2$$

7.3.2 URČENÍ PŘI NEPŘÍMÉ METODĚ MĚŘENÍ

$$u_{Ay}^2 = \sum_{j=1}^m A_{xj}^2 \cdot u_{A,xj}^2 \quad 7.3$$

kde pro převodové (citlivostní) koeficienty A_j platí:

$$A_{xj} = \left. \frac{\partial F(X)}{\partial X_j} \right|_{X=x} \quad 7.4$$

a pro výběrový rozptyl výběrového průměru platí:

$$u_{Axj}^2 = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_{ji} - \bar{x}_j)^2 \quad 7.5$$

$$\bar{x}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{ji} \quad 7.6$$

[4] [8] [60] [62]

7.4 STANDARTNÍ NEJISTOTA STANOVENÁ METODOU B

Nejistoty vyhodnocené metodou B nejsou závislé na počtu měření. Příčiny nejistot se všeobecně považují za známé, identifikovatelné a kvantifikované zdroje. Tyto nejistoty jsou ve většině případů celkovou nejistotou. Při opomenutí jediné významné složky se zničí celá stavba výpočtu nejistot. Charakter nejistot stanovených metodou B je individuální a vyžaduje znalosti příslušného oboru měření.

Vyhodnocení metodou B vychází z kvalifikovaného úsudku založeného na všech dostupných informacích o měřené veličině X a jejích možných změnách.

Zdroji informací mohou být:

- Dosavadní měření a výsledky získané při předchozích měřeních
- Zkušenosti a všeobecné znalosti o chování měřeného objektu, měřicích metodách, měřicích prostředcích a podmínkách měření
- Specifikace získané od výrobců a měřicích prostředcích a podmínkách používání
- Údaje z certifikátů, kalibračních listů, ověřovacích listů apod.
- Nejistoty referenčních údajů převzatých z různých pramenů

7.4.1 URČENÍ PŘI PŘÍMÉ METODĚ MĚŘENÍ

Rámcový postup stanovení nejistot metodou B je následující:

1. Vytipují se možné zdroje těchto nejistot $Z_1, Z_2, \dots, Z_j, \dots, Z_m$. Zdrojem nejistot při měření jsou nedokonalosti (vlastnosti nebo znalosti):
 - a) Použitím měřicích prostředků, především měřicích přístrojů a převodníků
 - b) Použitých měřicích metod
 - c) Podmínek měření, především hodnot ovlivňujících veličin
 - d) Konstant použitých při vyhodnocování
 - e) Vztahů (závislostí) použitých při vyhodnocování
2. Určí se standartní nejistota metodou B každého zdroje. To je možné dvěma způsoby, převzetím hodnot nebo odhadem.
 - a) Převzetím hodnot nejistot z technické dokumentace (certifikáty, kalibrační listy, technické normy, údaje výrobců použitých zařízení, technické tabulky, tabulky fyzikálních konstant apod.)
 - b) Základní metoda odhadu standartní nejistoty u_{Bx} typu B ze zdroje Z se skládá z následujících kroků:
 - 1) Odhadne se rozsah změn – odchylek $\pm z_{\max}$ od nominální hodnoty veličiny odpovídající zdroji, jejichž překročení je málo pravděpodobné
 - 2) Posoudí se průběh pravděpodobnosti odchylek v tomto intervalu a v Tab. 7.1 se najde jeho nejvhodnější aproximace
 - 3) Standartní nejistota typu B spojená s tímto zdrojem se určí ze vztahu 7.7.

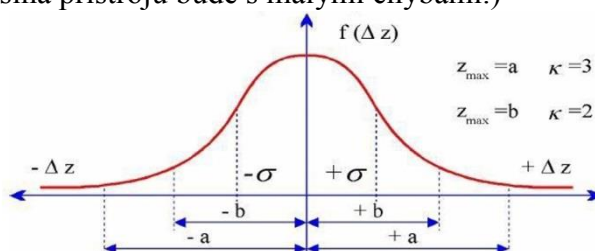
$$u_{zj} = \frac{z_{\max}}{\chi} \quad 7.7$$

Kde χ se převezme podle zvolené aproximace z Tab. 7.1.

Tab. 7.1: Používané aproximace

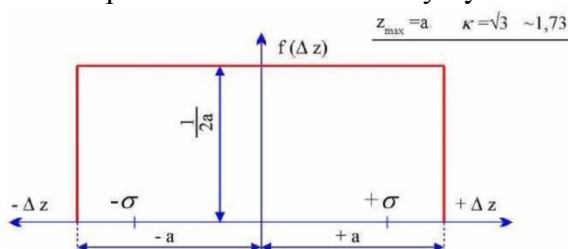
$\chi=2, \chi=3$	Gaussovo (normální) rozdělení
$\chi=\sqrt{3}$	Rovnoměrné rozdělení
$\chi=2,45$	Trojúhelníkové rozdělení

- Gaussovo (normální) rozdělení použijeme tehdy, kdy se častěji mohou vyskytovat odchylky od nominální hodnoty malých velikostí a s rostoucí velikostí klesá četnost jejich výskytu. (Např. je-li zdrojem nejistoty měřicí přístroj od spolehlivého výrobce a u kterého lze předpokládat, že většina přístrojů bude s malými chybami.)



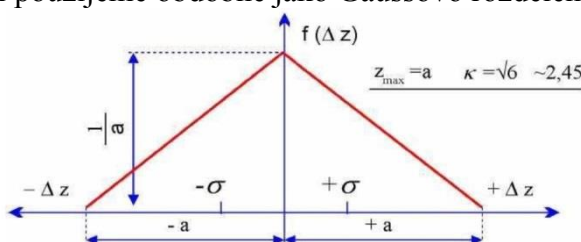
Obr. 7.1: Gaussovo (normální) rozdělení pravděpodobnosti [61]

- Rovnoměrné rozdělení použijeme tehdy, kdy je stejná pravděpodobnost výskytu jakékoliv odchylky v daném intervalu $\pm z_{\max}$. Tato aproximace se používá nejčastěji. Důvod je i ten, že nejčastěji nemáme dostatečné poznatky o rozdělení pravděpodobnosti výskytu odchylek a tedy nemáme důvod upřednostnit některé odchylky.



Obr. 7.2: Rovnoměrné rozdělení pravděpodobnosti [61]

- Trojúhelníkové rozdělení použijeme obdobně jako Gaussovo rozdělení.



Obr. 7.3: Trojúhelníkové rozdělení pravděpodobnosti [61]

Při použití číslicového měřicího přístroje je jedním ze zdrojů nejistoty rozlišitelnost poslední platné číslice. To znamená, že i při neměnění se údajů při opakovaném měření není nejistota nulová. Odhad nejistoty se v tomto případě zakládá na předpokladu rovnoměrného rozdělení v intervalu, který je vymezený rozlišitelností daného přístroje δ_{zi} . To stejné platí při použití analogového měřicího přístroje, kde odčitelnost je dána hodnotou dílku stupnice δ_z . Standardní nejistotu určíme pro oba případy ze vztahu 7.8.

$$u_{B_{zi}} = \frac{\delta_{zi}}{2\sqrt{3}} = 0,29 \cdot \delta_{zi} \quad 7.8$$

3. Přepočítají se určené nejistoty u_{zj} z jednotlivých zdrojů na odpovídající složky nejistoty měřené veličiny $u_{x,zj}$. Odhadnuté nejistoty z jednotlivých zdrojů Z_j se přenášejí do nejistoty naměřené hodnoty veličiny X a tvoří její složky $u_{x,zj}$, které se vypočítají ze vztahu 7.9.

$$u_{x,zj} = A_{x,zj} \cdot u_{zj} \quad 7.9$$

Kde hodnoty převodového (citlivostního) koeficientu $A_{x,zj}$ se stanoví ze závislosti

$$X = f(Z_1, \dots, Z_j, \dots, Z_m) \quad 7.10$$

Použitím vztahu (založeném na použití Taylorovy řady při zanedbání členů vyšších řádů).

$$A_{x,zj} = \left. \frac{\partial x}{\partial Z_j} \right|_{Z=z} \quad 7.11$$

Kde $z=[z_1, \dots, z_j, \dots, z_m]$ jsou aktuální hodnoty veličiny Z_j .

Jestliže závislost $X=f(Z)$ není známá, stanoví se $A_{x,zj}$ experimentálním měřením hodnoty Δx_{zj} při malé změně Δz_j a dosadíme do vztahu 7.12.

$$A_{x,zj} \approx \left. \frac{\Delta x_{zj}}{\Delta z_j} \right|_{Z=z} \quad 7.12$$

4. Posoudí se možnost korelací mezi jednotlivými zdroji nejistot typu B a v kladném případě se odhadnou hodnoty korelačních koeficientů $r_{zj,k}$ z intervalu $<-1,+1>$.
5. Přepočítané složky nejistot se sloučí do výsledné nejistoty u_{Bx} , která se spočítá dle vztahu 7.13.

$$u_{Bx} = \sqrt{\sum_{j=1}^m A_{x,zj}^2 \cdot u_{zj}^2} = \sqrt{\sum_{j=1}^m u_{x,zj}^2} \quad 7.13$$

7.4.2 URČENÍ PŘI NEPŘÍMÉ METODĚ MĚŘENÍ

$$u_{By}^2 = \sum_{j=1}^m A_{xj}^2 \cdot u_{B,xj}^2 \quad 7.14$$

kde A_{xj} jsou převodové koeficienty stanovené z příslušných parciálních derivací a $u_{B,xj}$ jsou nejistoty typu B jednotlivých vstupních veličin.

$$A_{xj} = \frac{\partial F(X)}{\partial X_j} \quad 7.15$$

Má-li X_j – tá veličina zdroje nejistot $Z_{j1} \dots Z_{jk} \dots Z_{jp}$

$$X_j = f(Z_{j1} \dots Z_{jk} \dots Z_{jp}) \quad 7.16$$

$$u_{Bxj}^2 = \sum_{k=1}^p A_{xjk}^2 \cdot u_{Bxjk}^2 \quad 7.17$$

Kde pro k-tý zdroj nejistoty je

$$A_{xjk} = \frac{\partial X_j}{\partial Z_{jk}} \quad 7.18$$

[4][8][61][62]

7.5 KOMBINOVANÁ STANDARTNÍ NEJISTOTA

V praxi je obvykle třeba společně jediným číslem vyjádřit nejistotu stanovenou metodou A a metodou B. K tomu se používá kombinovaná standartní nejistota, která se určí sloučením nejistot stanovených metodou A a metodou B.

Při určení kombinované standartní nejistoty je zapotřebí rozlišovat výpočet pro přímo a nepřímo měřené veličiny.

a) Přímé měřené veličiny

Jestliže předpokládáme, že není žádná závislost mezi zdroji nejistot vyhodnocovanými metodou A a B, potom v souladu s Gaussovým zákonem šíření nejistot platí pro kombinovanou standartní nejistotu vztah 7.19.

$$U_{Cx} = \sqrt{u_{Ax}^2 + u_{Bx}^2} \quad 7.19$$

b) Nepřímé měřené veličiny

U nepřímé měřené veličiny je možno určit kombinovanou standartní nejistotu dvěma postupy. První postup spočívá ve společném výpočtu, do kterého vstupují všechny parametry od nejistoty stanovenou metodou A a B, a to včetně příslušných kovariancí (výpočet je uveden v literatuře [8]). Druhý postup spočívá v samostatném určení nejistoty metodou A a B,

potom se výpočet provede dle vztahu pro přímo měřené veličiny. (příslušné kovariance jsou obsaženy v jednotlivých nejistotách).

Jednotlivé postupy jsou uvedeny a detailně rozebrány v literatuře [8] [62].

[4] [8] [61]

7.6 ROZŠÍŘENÁ NEJISTOTA MĚŘENÍ

Standartní nejistoty vytvářejí interval pokrývající skutečnou hodnotu měřené veličiny s poměrně malou pravděpodobností, přibližně 60%. Tato pravděpodobnost je většinou nedostatečná a v praxi se často požaduje hodnota nejistoty, která by vytvářela interval s větší pravděpodobností pokrytí skutečné hodnoty (až 100%). Taková nejistota se nazývá rozšířená nejistota, která se označuje U a určí se pomocí vztahu 7.20.

$$U = k \cdot u \quad 7.20$$

Při určení rozšířené nejistoty měření je nutné znát koeficient rozšíření (koeficient pokrytí) k . Hodnota k závisí na typu rozdělení pravděpodobnosti výsledku měření. Koeficient je možné určit dvěma způsoby, a to buď konvenčně nebo výpočtem.

- a) Konvenční hodnoty se pohybují od $k=2$ (rozšíření na 95%) do $k=3$ (rozšíření na 99,7%) a bývají obsaženy v technických normách a předpisech a v individuálních dohodách a technických podmínkách.
- b) Při výpočtu je nutné rozlišovat přímou a nepřímou metodu měření. Postup výpočtu a jednotlivé vztahy jsou uvedeny v literatuře [4] a [8].

[4] [8] [61]

8 NEJISTOTA TENZOMETRICKÉHO MĚŘENÍ

Převážná část zkoušek, které se provádí za pomoci tenzometrického měření je neopakovatelná a pro měřenou veličinu je známa pouze jedna hodnota (zatěžovací zkoušky, rozdílné podmínky při zkoušce apod.) Na základě tohoto poznatku je z větší části standardní nejistota měření stanovena metodou B.

Nejistotu stanovenou metodou A lze stanovit pouze za podmínky u nezávislých měřených vstupních veličin. Velikost u_A se stanoví na základě statistického zpracování opakovaného měření téže hodnoty jedné veličiny. Podmínkou je reprodukovatelnost všech opakovaných měření provedených za stejných podmínek (podmínky okolí, vnější zatížení apod.). Minimální počet opakovaných měření je 10 ($N \geq 10$). Určení se provádí dle kapitoly 7.3.

Nejistota stanovená metodou B se stanovuje pro neopakovatelná jednorázová měření, ale také pro měření, která splňují podmínku reprodukovatelnosti, ale počet opakovaných měření je menší jak 10 ($N < 10$). Při vyhodnocení je třeba rozlišovat nejistotu přetvoření a napětí. Nejistota přetvoření se určí na základě principu stanovení nejistoty měření u přímo měřené veličiny a nejistota napětí se určí na základě principu stanovení nejistoty u nepřímo měřené veličiny.

Rozšířená nejistota měření U pro přetvoření (napětí) se stanoví vynásobením standardní nejistoty $u(y)$ odhadu a koeficientem rozšíření k . [33]

8.1 STANOVENÍ NEJISTOTY PŘETVOŘENÍ METODOU B

Při vyhodnocení se postupuje dle teorie vyhodnocení nejistoty metodou B pro přímé měření, která je popsána v kapitole 7.4.1.

Výsledná nejistota se stanoví sloučením dílčích nejistot různého původu použitím zákona šíření nejistot. Odhad chyby se doporučuje udávat v jednotkách $\mu\text{m/m}$ (je možné udávat i v %). Všechny maximální chyby se převedou (přepočítají) z různých jednotek (rozměrů) na $\mu\text{m/m}$ a pak je možné volit citlivostní převodové koeficienty dle uvážení (nemusí se počítat). Pro výpočet citlivostních převodových koeficientů je nutné znát matematické modely závislosti vstupních chyb v různých jednotkách na přetvoření v $\mu\text{m/m}$. Ty jsou často dosti složité, nebo nejsou známy vůbec. Pokud se citlivostní převodové koeficienty nepočítají, používá se hodnota 1.

8.1.1 ZDROJE DÍLČÍCH NEJISTOT PŘETVOŘENÍ TYPU B

NEJISTOTA PARAMETRŮ TENZOMETRU

Nejistota k -faktoru tenzometru se stanoví na základě hodnot uvedených výrobcem na obalu snímače. Při výpočtu se používá rovnoměrné rozdělení pravděpodobnosti.

Ve většině případů je nejistota tak malá, že zásadně neovlivní výslednou nejistotu a proto se může vliv k -faktoru označit za zanedbatelný.

Chyba odporu R se nepromítá do nejistoty měření.

NEJISTOTA PŘÍČNÉ DEFORMACE TENZOMETRU

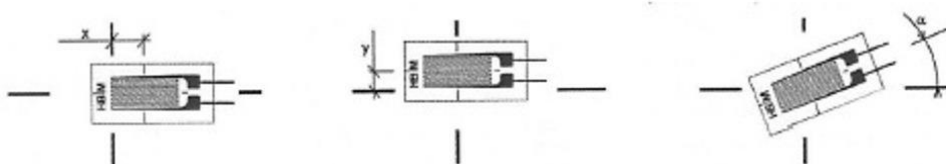
Chyba způsobená od příčné deformace (transverse sensitivity) je uvedena na každém balení tenzometrických snímačů. Předpokládá se rovnoměrné rozdělení pravděpodobnosti.

Ve většině případů je nejistota tak malá, že zásadně neovlivní výslednou nejistotu a proto se může vliv příčné deformace označit za zanedbatelný.

Poznámka: Chyba pro k -faktor a chyba příčné deformace je uváděná 2x pro tenzometrické kříže a 3x pro tenzometrické růžice (viz příloha B.1). Při výpočtu se předpokládá pouze jedna chyba a s tou se pak pracuje.

NEJISTOTA GEOMETRIE NALEPENÍ TENZOMETRU

Její velikost vyplývá z míry přesnosti nalepení snímače. Pro snadnější zapolohování je každý snímač opatřen osovým křížem a taktéž na měřené součásti je předem narýsován vyznačovací kříž, který definuje do jaké míry je tenzometr přesně nalepen.



Obr. 8.1: Geometrie nepřesnosti nalepení tenzometru [35]

Přípustná míra nepřesnosti činní v ose x a y maximálně 0,2 mm a úhel natočení α maximálně 5°.

Určení nejistoty od geometrie tenzometru je problematické v tom, že nelze jednoduše změřit vychýlení a odklon od osy snímače. Proto se musí při určování vycházet z kvalifikovaného úsudku a to tak, že se posoudí míra přesnosti nalepení snímače a podle toho se zvolí maximální možná odchylka. Nejistotu od vychýlení v ose x a y lze považovat vzhledem k její velikosti za zanedbatelnou a maximální chyba vzniklá od úhlu natočení by neměla přesáhnout 6 $\mu\text{m/m}$. Předpokládá se rovnoměrné rozdělení pravděpodobnosti.

NEJISTOTA TEPLOTNÍ DEFORMACE SNÍMAČE

Teplotní roztažnost a tomu odpovídající poměrná deformace je definovaná na každém balení tenzometrických snímačů. Pro tenzometry řady Y a pro rozsah teplot 0°C do 40°C odpovídá maximální chyba měřené deformace $\pm 9 \mu\text{m/m}$. Předpokládá se normální rozdělení pravděpodobnosti.

NEJISTOTA HYSTEREZE

Její velikost je značně závislá na počtu zatěžovacích a odlehčovacích cyklů. Po 10 zatěžovacích cyklech se většinou hystereze ustálí a maximální chyba nepřesáhne 0,1% z měřené deformace. Do 10 zatěžovacích cyklů může být chyba až 0,5% z rozsahu.

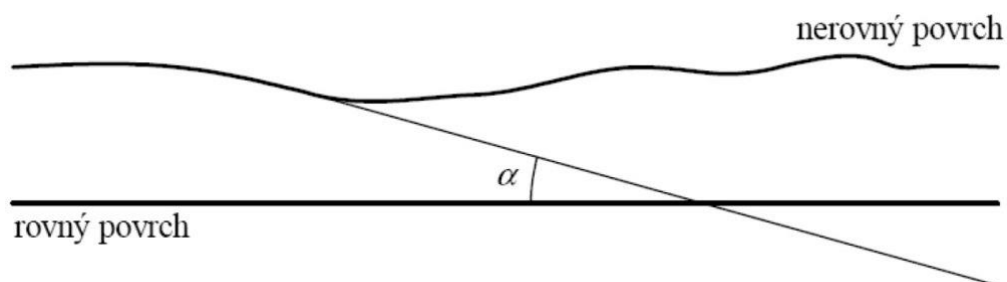
Pro výpočet se používá vztah 8.1. Tento vztah je analogický se vztahem 7.8, který je uveden v kapitole 7.4.1.

$$U_{bz} = \frac{\delta_z}{2\sqrt{3}} = 0,29 \cdot \delta_z$$

8.1

NEJISTOTA GEOMETRIE KVALITY POVRCHU MĚŘENÉHO MÍSTA

Při dodržení podmínek a pravidel lepení tenzometrů je jedinou nejistotou z hlediska kvality povrchu případná nerovnost vzniklá přílišným broušením v jednom místě.



Obr. 8.2: Nerovný povrch měřeného místa [35]

Nerovnost povrchu se připouští velmi malá (max. $0,5^\circ$). Jelikož se nedá nerovnost povrchu velmi rychle a kvalitně změřit, doporučuje se hodnotu určovat na základě zkušeností, které vyplývají z velikosti tenzometru a kvality obroušené plochy. Předpokládá se rovnoměrné rozdělení pravděpodobnosti. Maximální přípustná nejistota je $5 \mu\text{m/m}$.

NEJISTOTA LEPIDLA

Nejistota lepidla se týká zejména plastických deformací, které vznikají z nedokonalých pružných vlastností lepidla. Tyto plastické deformace jsou dány výrobcem (HBM) a jsou definovány pro první a třetí zatěžovací cyklus (po třetím cyklu se plastická deformace dále nemění). Definované nejistoty pro zatěžovací cykly jednotlivých lepidel jsou uvedeny v Tab. 8.1. Parametry jsou definovány pro tenzometry série Y. Při referenční teplotě 23°C .

Tab. 8.1: Definované nejistoty měření pro zatěžovací cykly jednotlivých lepidel [41]

Lepidlo HBM	Poměrná statická deformace [$\mu\text{m/m}$]
Z70 (první cyklus)	1,0
Z70 (třetí cyklus)	0,5
X60 (první cyklus)	2,5
X60 (třetí cyklus)	1,0
EP250 (první cyklus)	1,0
EP250 (třetí cyklus)	1,0

NEJISTOTA KABELU PROPOJUJÍCÍ TENZOMETRY S ÚSTŘEDNOU

Určení této nejistoty je značně problematické. Maximální chyba je dána nespočtem rušivých elementů. Jsou tvořeny zejména třemi skupinami (kabel, připojení, prostředí). Pro maximální minimalizaci nejistoty se doporučuje používat pro propojení tenzometrů s ústřednou kvalitní stíněné kabely. Dále pak volit délku kabelu co nejmenší a používat tři a čtyř drátové zapojení. Kompenzaci změny odporu kabelu v důsledku změny teploty provádí většinou samotné měřicí ústředny.

V ideálním případě je nejistota od kabelu rovna nule. Z technické praxe měření však lze uvažovat o nejistotě $2 \mu\text{m/m}$ pro stíněný nepoškozený kabel maximální délky 5 m, který je zapojen čtyř drátové a v okolním prostředí se vyskytují standartní rušivé vlivy.

Pokud by se kabel používal např. v prostředí, kde se vyskytuje extrémní magnetické rušení, bude podle okolností nejistota větší. Maximální nejistota by však neměla přesahovat $10 \mu\text{m/m}$.

NEJISTOTA MĚŘICÍ ÚSTŘEDNY

Nejistota měřicí ústředny je většinou uvedena v kalibračním listu, který obsahuje zjištěné hodnoty chyb. V chybách jsou obsaženy všechny prvky ústředny jako je zdroj, Wheatstonův můstek, apod. Pokud není měřicí ústředna kalibrována, lze nejistotu určit na základě kvalifikovaného úsudku z praxe, a to zejména z podkladů z dlouhodobých pozorování.

Pokud se při měření nepoužívá standartní komerční ústředna přímo od výrobce (HBM apod.) a je ústředna poskládána z jednotlivých součástek, je nutné vypočítat nejistotu z jednotlivých prvků.

Údaj o nejistotě měřicí ústředny by měl být doplněn seznamem nebo blokovým schématem prvků ústředny, které jsou zahrnuty v nejistotě.

NEJISTOTA KABELU PROPOJUJÍCÍHO MĚŘICÍ ÚSTŘEDNU S PC

Nejistota z hlediska přenosu dat je nepřijatelná. V případě, že by došlo k jakékoliv kolizi v přenosu dat, je nutné přenos opakovat.

8.1.2 VÝPOČET NEJISTOTY PŘETVOŘENÍ TYPU B

Výpočet standartní nejistoty přetvoření u_{Be} se provádí dle vztahu 7.13 uvedeného v kapitole 7.4.1

8.2 STANOVENÍ NEJISTOTY NAPĚTÍ METODOU B

Při výpočtu je nutné rozlišit, jestli byla měřená napjatost jednoosá nebo rovinná, respektive jakým typem tenzometru byla měřená. Princip výpočtu je stejný, ale rozdíl je v počtu dílčích nejistot. Při výpočtu se předpokládá, že jsou všechny veličiny nekorelované a jejich kovariance se nepočítají. Tak jako při stanovení nejistoty pro přetvoření, používá se zákon šíření nejistot i pro napětí. Princip výpočtu je podobný jako při výpočtu nejistoty přetvoření. Pro napětí se uvažují 3 dílčí zdroje nejistot a to od přetvoření, modul pružnosti a Poissonovy konstanty (odhad nejistoty zůstává v původních jednotkách veličiny a nepřepočítává se na MPa, převod se provede v citlivostních koeficientech). Hlavní změna nastává při výpočtu citlivostních koeficientů. Matematické modely všech veličin (ε , E , μ),

kteřé vstupují do výpočtu napětí jsou známy, a proto není problém vypočítat jednotlivé citlivostní koeficienty.

8.2.1 ZDROJE DÍLČÍCH NEJISTOT NAPĚTÍ TYPU B

Nejistota přetvoření - u_ε

Výpočet nejistoty je uveden v kapitole 8.1. Ačkoliv do výpočtu vstupuje cca 10 dílčích nejistot, které nejde zpravidla nijak zásadně ovlivnit (snížit), výsledná nejistota by neměla přesáhnout $\pm 20 \mu\text{m/m}$.

Nejistota modulu pružnosti - u_E

Chyba modulu pružnosti (δ_E) se pohybuje v rozmezí od 5% do 15%. Pokud není chyba přesně známa, například že by se určila při tahové zkoušce materiálu, uvažuje se 10%. Při výpočtu se používá rovnoměrné rozdělení pravděpodobnosti.

Nejistota Poissonova čísla - u_μ

Chyba Poissonova čísla (δ_μ) se uvažuje v rozmezí 1 až 10%. Při výpočtu se používá rovnoměrné rozdělení pravděpodobnosti.

8.2.2 VÝPOČET NEJISTOTY NAPĚTÍ TYPU B PRO JEDNOOSOU NAPJATOST

Při výpočtu se vychází z Hookova zákona (viz 3.5.1 a 5.4.1), který udává vzájemnou závislost σ na ε a E . Jak je vidět na vztahu 7.14, výsledná nejistota napětí bude součtem nejistoty od ε a E .

Výpočet standartní nejistoty se provádí dle vztahu 7.17 uvedeného v kapitole 7.4.2.

Výpočet citlivostních koeficientů se pak provádí dle vztahu 7.18 (kapitole 7.4.2).

$$A_\varepsilon = \frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon} = \frac{\partial(\varepsilon \cdot E)}{\partial \varepsilon} = E \left[\frac{\text{MPa}}{\mu\text{m/m}} \right] \quad 8.2$$

$$A_E = \frac{\partial \sigma}{\partial E} = \frac{\partial(\varepsilon \cdot E)}{\partial E} = \varepsilon \quad [-] \quad 8.3$$

8.2.3 VÝPOČET NEJISTOTY NAPĚTÍ TYPU B PRO DVOJOSOU NAPJATOST

Jak je uvedeno v kapitole 5.4.2, dvojosou napjatost je možné zjistit dvěma způsoby a to tak, že pokud známe směry napětí použijeme pro měření přetvoření tenzometrické kříže a pokud neznáme směry napětí použijeme pro měření přetvoření tenzometrické růžice. Při výpočtu nejistoty se zavede předpoklad, který platí pro všechny snímače, kterými se měří dvojosá napjatost. Pro tenzometrické kříže je $\varepsilon_I = \varepsilon_{II} = \varepsilon$ a pro tenzometrické růžice je $\varepsilon_a = \varepsilon_b = \varepsilon_c = \varepsilon$. Pokud se aplikuje předpoklad na vztahy 5.5, 5.6, 5.8 a 5.11, pak je vztah 8.4 na výpočet napětí pro všechny zmíněné tenzometry stejný. Tento vztah se pak používá při výpočtu citlivostních koeficientů.

$$\sigma = \frac{\varepsilon \cdot E}{1 - \mu} \quad 8.4$$

Výpočet standartní nejistoty se provádí dle vztahu 7.17 uvedeného v kapitole 7.4.2.

Výpočet citlivostních koeficientů se pak provádí dle vztahu 7.18 uvedeného v kapitole 7.4.2 a je následující:

$$A_{\varepsilon} = \frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon} = \frac{\partial \left(\frac{\varepsilon \cdot E}{1 - \mu} \right)}{\partial \varepsilon} = \frac{E}{1 - \mu} \left[\frac{\text{MPa}}{\mu\text{m/m}} \right] \quad 8.5$$

$$A_E = \frac{\partial \sigma}{\partial E} = \frac{\partial \left(\frac{\varepsilon \cdot E}{1 - \mu} \right)}{\partial E} = \frac{\varepsilon}{1 - \mu} [-] \quad 8.6$$

$$A_{\mu} = \frac{\partial \sigma}{\partial \mu} = \frac{\partial \left(\frac{\varepsilon \cdot E}{1 - \mu} \right)}{\partial \mu} = \frac{\varepsilon \cdot E}{(1 - \mu)^2} [\text{MPa}] \quad 8.7$$

Při výpočtu se stejným postupem vypočítají obě dvě hlavní napětí ($\sigma_{I,II}$). S tím rozdílem, že se pro každé napětí dosadí do zmíněných vztahů odpovídající přetvoření ($\sigma_I - \varepsilon_I$, $\sigma_{II} - \varepsilon_{II}$).

Poznámka: U tenzometrických růžic se standardně nepočítá nejistota úhlu α .

8.2.4 VÝPOČET NEJISTOTY NAPĚTÍ TYPU B PRO REDUKOVANÉ NAPĚTÍ

Při výpočtu se vychází ze vztahu pro rovinou napjatost redukovaného napětí dle hypotézy HMM. Viz kapitola 3.3. Citlivostní koeficienty se vypočítají dle teorie popsané v kapitole 7.4.2.

$$A_{\sigma_I} = \frac{\partial \sigma_{red}}{\partial \sigma_I} = \frac{\partial \left(\sqrt{\sigma_I^2 + \sigma_{II}^2 - \sigma_I \cdot \sigma_{II}} \right)}{\partial \sigma_I} = \frac{2 \cdot \sigma_I - \sigma_{II}}{2 \cdot \sqrt{\sigma_I^2 + \sigma_{II}^2 - \sigma_I \cdot \sigma_{II}}} [-] \quad 8.8$$

$$A_{\sigma_{II}} = \frac{\partial \sigma_{red}}{\partial \sigma_{II}} = \frac{\partial \left(\sqrt{\sigma_I^2 + \sigma_{II}^2 - \sigma_I \cdot \sigma_{II}} \right)}{\partial \sigma_{II}} = \frac{2 \cdot \sigma_{II} - \sigma_I}{2 \cdot \sqrt{\sigma_I^2 + \sigma_{II}^2 - \sigma_I \cdot \sigma_{II}}} [-] \quad 8.9$$

8.3 ROZŠÍŘENÁ NEJISTOTA MĚŘENÍ PRO TENZOMETRICKÉ MĚŘENÍ

U tenzometrického měření se výhradně používá normální (Gaussovo) rozdělení s 95% pokrytí. Výsledný vztah pro výpočet rozšířené nejistoty je pak dán vztahem 8.10.

$$U = 2 \cdot u(y) \quad 8.10$$

K výsledku musí být připojena poznámka ve tvaru:

Uvedená rozšířená nejistota měření je součinem standardní nejistoty měření a koeficientu rozšíření $k=2$, což pro normální rozdělení odpovídá pravděpodobnosti pokrytí cca 95%. Standardní nejistota měření byla určena v souladu s dokumentem EA 4/02.

8.4 UDÁVÁNÍ VÝSLEDKŮ ANALÝZY NEJISTOT PRO TENZOMETRICKÉ MĚŘENÍ

Analýza nejistot pro určité měření (= přehled nejistot měření) musí obsahovat seznam všech zdrojů nejistot spolu s jejich standardními nejistotami měření. Pro přehlednost je doporučeno uvádět všechny údaje vztahující se k této analýze v bilanční tabulce. Pro každou uvedenou veličinu musí být spolu s hodnotou uveden i její rozměr. Pro lepší přehlednost je možné uvádět příspěvky ke standardní nejistotě ve sloupcovém grafu, kde je přehledně znázorněn vliv jednotlivých veličin na celkovou nejistotu.

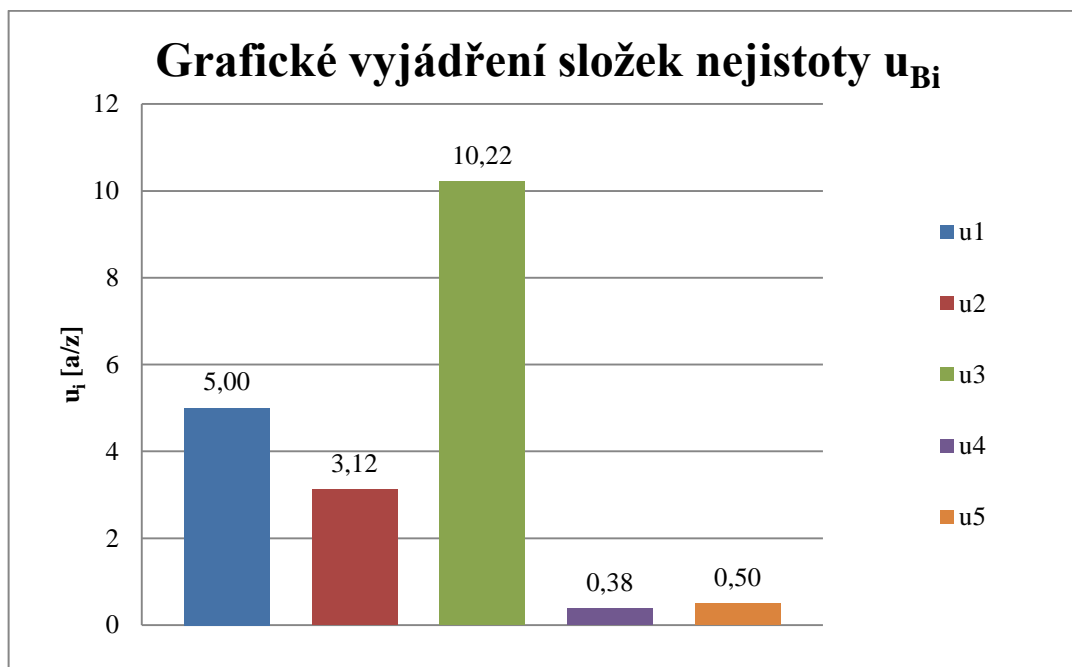
Ve výsledné analýze je vhodné uvádět samostatně tabulky (grafy) pro přetvoření a napětí.

Tab. 8.2: Ukázka bilanční tabulky při výpočtu nejistoty pro přetvoření

Veličina	Odhad	Standardní nejistota	Typ rozdělení	Citlivostní koeficient	Příspěvek ke standardní nejistotě
X_i	x_i	$u(x_i)$	χ	A_i	$u_i(y)$
	$[\mu\text{m/m}]$	$[\mu\text{m/m}]$	$[-]$	$[-]$	$[\mu\text{m/m}]$
X_1	x_1	$u(x_1)$		A_1	$u_1(y)$
\dot{X}_N	\dot{x}_N	$\dot{u}(\dot{x}_N)$		\dot{A}_N	$\dot{u}_N(y)$
Y					$u(y)$

Tab. 8.3: Ukázka bilanční tabulky při výpočtu nejistoty pro napětí

Veličina	Odhad	Standardní nejistota	Citlivostní koeficient	Příspěvek ke standardní nejistotě
X_i	x_i	$u(x_i)$	c_i	$u_i(y)$
	$[a]$ $[z]$	$[a]$ $[z]$	$[a/z]$	$[MPa]$
X_1	x_1	$u(x_1)$	A_1	$u_1(y)$
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
X_N	x_N	$u(x_N)$	A_N	$u_N(y)$
Y				$u(y)$



Graf 8.1: Ukázka sloupcového grafu pro vypočtené nejistoty přetvoření (napětí)

[31] [33] [61]

9 MĚŘENÍ NA SPIRÁLE PŘED GENERÁLNÍ OPRAVOU

Cílem měření bylo provést komplexní měření stávajícího stavu soustrojí a vytvoření podkladu, který umožní srovnání vlastností soustrojí Lipno I TG2 před a po generální opravě. Měření se zúčastnily dvě firmy a to firma ČKD Blansko Engineering (generální dodavatel nového soustrojí), která prováděla měření tlakových pulzací ve spirále, savce a v okruhu chladicí vody, vibrací, regulační práce, hluku, axiálního hydraulického tahu a firma ÚAM Brno, která prováděla měření napjatosti na spirále. Všechna měření se prováděla v různých provozních režimech. Zkoušky probíhaly v říjnu 2012.

Měření, které prováděl ÚAM Brno, bylo prováděno za účelem zjištění napjatosti spirály. Tyto hodnoty byly předány výpočtářům, kteří je použili na kalibraci a ověření výpočtu životnosti spirály TG1 (spirála zůstává původní) v programu ANSYS.

9.1 ZÁKLADNÍ TECHNICKÁ DATA

9.1.1 PARAMETRY

Tab. 9.1: Základní technické parametry turbíny před GO

Výrobce	ČKD Blansko, závody J. Dimitrova, národní podnik
Rok výroby	1958 - 1959
Typ turbíny	Francisova turbína F20
Max. spád turbíny	H=162 m
Max. Výkon	P=63,2 MW
Průtok turbínou	Q=45 m ³ /s
Průměr oběžného kola	D= 2200 mm
Počet rozváděcích lopatek	Z _{rozv} = 24
Počet oběžných lopatek	Z _{ob} = 17
Provozní otáčky	n=375 min ⁻¹
Průběžné ustálené otáčky	n _{zv} = 730 min ⁻¹

9.1.2 SPIRÁLNÍ SKŘÍŇ

Spirální skříň TG2 byla tvořena plechovou spirálou sestávající se z plechových segmentů přivařených k ocelolitinovému lopatkovému kruhu. Horní a dolní kruhy lopatkového kruhu jsou s výztužnými předrozváděcími lopatkami odlity vcelku. Z montážních důvodů byla rozdělena na 4 kusy, které byly svařeny na místě montáže. Spirální skříň byla žíhána pro odstranění vnitřního pnutí. Spodní část spirály byla zabetonovaná (v době před odstraněním spirály byl beton od pláště odtržený, což způsobovalo stékání kondenzované vody mezi ocelový plášť a beton, kde voda způsobovala důlkovou korozi). Svařovaná konstrukce spirály byla dimenzována na tlak 2,5 MPa při zkušebním tlaku 3,2 MPa. Po neúspěšné 1. tlakové zkoušce došlo ke snížení tlaku na 2,8 MPa. Při opakované tlakové zkoušce, při které byl snížen zkušební tlak na 2,8 MPa došlo k trvalým deformacím v místech, kde byla překročena R_e , výdrž na tlaku 2,8 MPa byl asi 25 minut. Více o spirální skříni v bodě 2.4.2.) [24] [30]



Obr. 9.1: Montáž spirální skříně v roce 1958 [48]

Obr. 9.2: Demontáž spirální skříně v roce 2012 [44]

Tab. 9.2: Mechanické vlastnosti použitých materiálu na výrobu spirální skříně [21]

Díl	Spirála	Lopatkový kruh	Předrozváděcí lopatka
Ocel	10 373.1 – 10 374.1	-	-
t [mm]	15 - 30	-	-
R_e [MPa]	250 - 260	-	-
R_m [MPa]	380 - 390	-	-

MATERIÁL 10 373.1 A 10 374.1

V současné době se tyto oceli už nevyrábí a dle ČSN se nepředpokládá a nedoporučuje provedení svařovaných namáhaných konstrukcí z ocelí třídy 10, které se v dnešní době používají pro pevnostně méně náročné strojírenské výrobky a pro výztuže do betonu. Tyto oceli mají předepsané pevnostní vlastnosti, ale nezaručené chemické složení. [21]

LOPATKOVÝ KRUH A PŘEDROZVÁDĚCÍ LOPATKA

Nepodařilo se dohledat původní materiálové podklady k těmto částem spirální skříně.

Tab. 9.3: Nezávislé materiálové vlastnosti použitých materiálů

E [MPa]	210 000
μ [-]	0,3

9.2 POPIS ZKOUŠEK

Měření je součástí zakázky „Posouzení spirály TG1“, kterou si objednal ČEZ, a.s. Vodní elektrárny se sídlem ve Štěchovicích u ÚAM Brno. Celá zakázka byla úspěšně dokončena v květnu 2014.

9.2.1 ČASOVÝ HARMONOGRAM A PERSONÁLNÍ OBSAZENÍ ZKOUŠEK

Všechny přípravné práce i měření probíhalo v součinnosti techniků ČKD Blansko Engineering a ÚAM Brno. Přípravné práce probíhaly od 22. 10. 2012 do 24. 10. 2012 a měření probíhalo 25. 10. 2012.

Za ÚAM Brno se na měření podíleli: Ing. Josef Floryán, Bc. Pavel Dokoupil, Miroslav Sehnal, Jiří Karafiát a vyhodnocení prováděl Bc. Pavel Dokoupil.

Za ČKD Blansko Engineering se na měření podíleli: Ing. Tomáš Klapal, Jiří Novotný, František Jelínek. [26]

Za Provoz elektrárny se měření zúčastnili: Ing. Bedřich Kučera a provozní technici elektrárny. [26]

9.2.2 ROZMÍSTĚNÍ SNÍMAČŮ

Celkem bylo na spirálu nainstalováno 10 tenzometrických pravoúhlých růžic (typ: HBM - 6/120 RY 11) ve třech rovinách a na 4 segmentech spirály (na segmentu spirály č.19 byl tenzometr jenom v jedné rovině). Umístění snímačů bylo voleno tak, aby se napětí pohybovalo v oblasti pružných deformací. Tahle volba byla učiněna z následujících důvodů, které vycházejí z použití výsledků měření a problematiky napjatosti spirály VE Lipno I.

- Pro účel ke kterému slouží měřené napětí (kalibrace výpočtu) je dostačující (i lepší) když se hodnoty přetvoření – napětí pohybují v pružné oblasti.
- Vyhodnocení za mezí kluzu materiálu R_e v oblasti rovnoměrných pružně plastických deformací je složitější a k jejímu vyhodnocení jsou potřeba údaje z tahové zkoušky materiálu.

Schéma rozmístění snímačů je v příloze B.4.

9.2.3 FOTODOKUMENTACE



Obr. 9.3: Pohled na měřenou spirálu



Obr. 9.4: Pohled na tlakový odběr a snímač tlaku



Obr. 9.5: Pohled na tenzometrickou růžici (směry růžice) - vybraný tenzometr



Obr. 9.6: Pohled na chráněný tenzometr – vybraný tenzometr



Obr. 9.7: Pohled na kulový uzávěr (zavřený)



Obr. 9.8: Pohled na řídicí systém elektrárny s parametry soustrojí

9.3 ROZBOR MĚŘENÍ

9.3.1 POPIS MĚŘENÝCH STAVŮ

Celá zkouška spočívala v měření při určitých stavech soustrojí a při určité časové výdrži na stavu soustrojí. Jak je vidět v příloze B.5 a B.6. Celkem nastalo během měření 51 stavů, které byly rozděleny do 6 skupin a to podle chování soustrojí (soustrojí stojí, otevření KU, zavření KU, najetí, chod a přejetí).

- a) Soustrojí stojí
Soustrojí není v chodu. Kulový uzávěr je uzavřený. Voda ve spirále cca 90 cm. Tlak ve spirále je nulový (respektive tlak ve spirále je pouze od zbytku vody ve spirále).
- b) Otevření KU
Před otevřením kulového uzávěru se spirála napustí obtokem vodou. Pak se postupně otevře kulový uzávěr a na spirálu začne působit tlak p_1 . Tlak je roven hodnotě $(H - Y_z)$. Kde Y_z jsou místní ztráty, které jsou součtem ztrát ve vstupu, výstupu a přívaděči. Rozvaděč je zavřený.
- c) Chod soustrojí
Kulový uzávěr je otevřený, na spirálu působí tlak o velikosti p_1 . Poloha regulačního kruhu dle požadovaného výkonu soustrojí.
- d) Najetí (přejetí)
Při najetí se začne soustrojí otáčet na jmenovité otáčky a mění se poloha regulačního kruhu.
- e) Poruchové odstavení (zavření KU)
Postupně se začne zavírat rozvaděč a kulový uzávěr. Ve spirále zůstává zbytek vody, která nestačí odtéct. Tlak ve spirále je nulový (respektive tlak ve spirále je pouze od zbytku vody ve spirále).

Poznámka: Spirála bez vody je pouze po odstavení soustrojí, zahrazení spodní vody (od vývaru) a odčerpání vody. Tento fakt je dán tím, že práh vývaru je 561,05 m.n.m. a osa vodorovného přívaděče (spirály) je 561,40 m.n.m. To znamená, že i při dlouhé odstávce soustrojí je voda ve spirále (cca 90 cm) po kótu prahu vývaru, neboť před odpadním tunelem má vývar tvar sifonu stále zaplněný vodou.

9.3.2 TENZOMETRICKÉ MĚŘENÍ

Instalace tenzometrických snímačů byla provedena pomocí postupu stanoveného výrobcem snímačů firmy HBM. Parametry použitých snímačů (kopie výrobní dokumentace) jsou uvedeny v příloze B.1. O instalaci tenzometrických snímačů byl vypracován protokol, který je uveden v příloze B.2.

Postup instalace tenzometrických snímačů:

- a) Označení míst pro nalepení tenzometrů (vyznačení směrů tenzometru a, b, c).
- b) Nalepení tenzometrů a 1. elektrická kontrola (pro nalepení bylo použito dvousložkové lepidlo X60) celý proces lepení je popsán v kapitole 5.5.
- c) Připojení tenzometrů ke kabelům a 2. elektrická kontrola.
- d) Instalace ochranných prvků proti vnějším vlivům. Nejprve byl použit polyuretanový lak PU 120 a následně byly na tenzometry instalovány tmel AK22 a ABM 75.
- e) Zapojení kabelů do měřicí ústředny (EMS DV 803).
- f) Nastavení měření v programu Monitor 5.4.4. – EMS Brno – finální kontrola všech tenzometrů.

Poznámka: Elektrická kontrola (revize) spočívá v kontrole elektrického izolačního odporu a elektrického odporu. Elektrický izolační odpor by měl být větší jak $20\text{ M}\Omega$ a elektrický odpor všech snímačů by měl být v tolerančním poli udávaným výrobcem ($120\text{ }\Omega$, $350\text{ }\Omega$, apod.).

Během měření byla data ze všech tenzometrů ukládána do vnitřní FLASH paměti měřicí ústředny frekvencí 400 Hz a současně byly on-line přenášeny do nadřazeného počítače.

Po ukončení měření byla všechna data vyexportována do formátu *.txt pro další práci (vyexportovaný soubor musí obsahovat datové i časové soubory).

9.3.3 MĚŘENÍ TLAKU

Hodnoty tlaku ve spirále byly poskytnuty z ČDK Blansko Engineering. Celkem bylo poskytnuto 24 souborů v datovém formátu *.txt. Každý soubor obsahoval hodnoty pro různé provozní stavy, které nastaly během měření 25. 10. 2012. Měření tlaku bylo prováděno absolutním snímačem tlaku BD Sensors DMP 333 s rozsahem 0-5 MPa. Kalibrační list je v příloze B.3.

9.3.4 MĚŘENÍ OSTATNÍCH VELIČIN

Hodnoty výkonu, stav kulového uzávěru (otevřen – zavřen), poloha regulačního kruhu (otevření rozvaděče) a geodetický spád byly dodány z centrálního dispečinku vodních elektráren ve Štěchovicích. Hodnoty byly ve formátu *.txt a byly v minutových intervalech (veličiny jsou statické – z toho plyne, že minutový interval je naprosto dostačující). Snímače ani kalibrační listy od snímačů nebyly dodány (pro vyhodnocení nejsou tyto data důležitá) hodnoty jsou pouze orientační.

Další provozní hodnoty byly během měření zdokumentovány formou fotografie z řídicího systému elektrárny. Data sloužila ke kontrole měřených dat a popřípadě k doplnění chybějících údajů. Ze všech provozních stavů, které nastaly během měření, jsou udělány fotografie řídicího systému.

9.4 VÝSLEDKY MĚŘENÍ

9.4.1 TENZOMETRICKÉ

Ze všech tenzometrů je pořízen kontinuální digitální záznam. Z tenzometrických růžic (tenzometry a, b, c) byly vypočteny hlavní přetvoření, hlavní napětí, úhel mezi tenzometrem a a hlavním napětím, respektive přetvoření viz 5.4.2. Dále byly vypočtené redukované napětí a to podle metody HMM viz 3.3. E , μ a R_e se pro výpočet použil z materiálového listu viz Tab. 9.3.

Na základě druhu měření a všech výsledků σ_{red} byla prostá bezpečnost spočtena pro největší hodnotu σ_{red} . Vzhledem k tomu, že je pro maximální redukované napětí $k_k=2,7$, nebude u dalších stavů prostá bezpečnost vůbec počítána.

Nulová hodnota pro tenzometry je stav, kdy byla spirála napuštěna vodou (kulový uzávěr byl zavřený a část vody ze spirály otekla), ale spirála nebyla celá bez vody. Pravá nulová hodnota by byla, pokud by byla spirála zcela bez vody. Tento stav je možné navodit, avšak během měření nenastal a předpokládá se, že chyba způsobená tímto stavem je téměř minimální.

Znaménková konvence je následující + značí tah a – značí tlak.

Pro vyhodnocení se použily tři softwary (Monitor 5.4.4., NextView 4.5. a Microsoft Office 2010). Program monitor se použil pouze pro měření a následný export dat do formátu *.txt. Program NextView se použil k načtení měřených dat, ze kterých bylo vypočteno přetvoření a napětí. Následně byly z přepočtených dat vytvořeny časové průběhy veličin (grafy). Program Excel se použil pro přepočty a vyhodnocení měřených dat, vytvoření tabulek a pro statistické zpracování naměřených dat. Zpráva byla napsána v textovém editoru Word.

Kalibrace tenzometrických snímačů se standardně neprovádí. Pokud se stane, že nějaký tenzometr ukazuje výrazně vyšší hodnotu nebo jsou výsledky nereálné, provede se kompletní kontrola tenzometru (mechanická, elektrická apod.). Možným důkazem o nefunkčnosti tenzometru může být například to, že hysterézní křivka má velmi neobvyklý tvar nebo, že hodnoty tenzometru pro stejný zatěžovací stav nejsou stejné a po odlehčení se nevrací do výchozího stavu. Vždy, když tenzometr vykazuje neobvyklé chování, nebo ukazuje nereálné hodnoty, je nutno tento tenzometr vyřadit z měření.

Během zkoušek měřily všechny tenzometry korektně.

POSTUP PŘI VYHODNOCENÍ:**1. EMS**

Export naměřených dat do formátu *.txt (vyexportovaný soubor musí obsahovat datové i časové soubory). Označení souboru po exportu je následující - D121025_101. První písmeno a šest čísel značí rok, měsíc a den kdy bylo měření prováděno a poslední tři číslice jsou volitelné.

2. NextView

- a) Načtení dat ve formátu *.txt a kontrola celistvosti a úplnosti údajů.
- b) Přepočtení dat na jednotlivé kanály a uložení pod názvy jednotlivých tenzometrů a jejich směrů. Ukládá se ve formátu *.lfx.
- c) Rychlá Fourierova transformace (FFT) vybraných vzorků měření. Často se stává, že se do signálu připlétou parazitní vlivy, které skreslují a znehodnotí měření, v největší míře se vyskytují parazitní vlivy od napětí, které je v el. síti. (50 Hz a jeho násobky, 100, 150 atd.). V případě že se jedná o dynamická měření, která mají za úkol zjistit frekvenci kmitání, je potřeba při odfiltrování složek signálu postupovat velice obezřetně, aby se neodfiltrovala funkční složka signálu.
- d) Jelikož se objevilo rušení na 50 Hz, byla ze signálů tato složka odfiltrována. Uložení všech signálů pod novým názvem.
- e) Redukce signálu 1:8. To znamená, že hodnoty jsou pře vzorkované z 400 Hz na 50 Hz. Vzhledem k tomu, že se nám nejedná o dynamické měření, postačí vzorkování 50Hz. Z toho plyne, že data jsou dále zpracována s přesností na dvě desetinná místa (redukce signálu se provádí za účelem zmenšení celkové velikosti jednotlivých signálů). Uložení všech signálů pod novým názvem.
- f) Vynulování jednotlivých signálů (vzhledem k tomu, že se nulový stav pro tenzometry určoval dodatečně, nebyly tenzometry po nalepení nulovány). Na základě určení nulového stavu se tenzometry vynulovaly. Provádí se tak, že se určí hodnota signálu, která je měřena při stavu nula a od této hodnoty se odečtou, anebo přičtou jednotlivé signály – podle orientace znamének.
- g) Výpočet hlavních přetvoření a napětí (načtení do grafů – časové průběhy).
- h) Výpočet redukovaného napětí (načtení do grafů – časové průběhy).
- i) Pro všechny tenzometry byly odečteny hodnoty (ϵ_a , ϵ_b , ϵ_c) při různých provozních stavech. Program umožňuje odečet dat, který se provádí v předem určených mezích (určí se začátek a konec oblasti). Z této oblasti program vyhodnotí maximum, minimum, a střední hodnotu takto ohraničeného signálu.

Poznámka: Po každé operaci, která nějakým způsobem transformuje signál, je potřeba nový signál uložit pod novým označením. Je možné, že při úpravě signálu vznikne chyba a to už technická nebo rozvahou a je potřeba se vrátit k původním signálům.

3. Microsoft Excel

- a) Výpočet hlavních přetvoření, napětí, a redukovaného napětí (při výpočtu byly použity hodnoty ϵ_a , ϵ_b , ϵ_c , který byly odečteny v předchozím bodě 2.i).
- b) Výpočet nejistot naměřených dat viz 9.6.1.
- c) Vytvoření finálních tabulek s výsledky měření viz příloha B.10.
- d) Vytvoření porovnávacích grafů viz příloha B.9.
- e) Výpočet k_k pro $\sigma_{red} - \max$.

4. Microsoft Word

- a) Vytvoření zprávy z měření viz [22]

UKÁZKA VÝPOČTU HLAVNÍCH PŘETVOŘENÍ, NAPĚTÍ, REDUKOVANÉHO NAPĚTÍ A PROSTÉ BEZPEČNOSTI

Rozbor výpočtu přetvoření a napětí je proveden pro měřený stav 34 a měřicí bod R9-2. Ten to stav byl zvolen na základě velikosti redukovaného napětí (v tomto stavu je největší σ_{red} ze všech stavů a měřicích bodů).

Výpočet byl proveden dle teorie pro tenzometrické růžice, která je popsána v kapitole 5.4.2. Hodnoty E a μ viz Tab. 9.3 a R_e viz Tab. 9.2.

Tab. 9.4: Hodnoty pro výpočet hlavních přetvoření, napětí a redukovaného napětí

Stav	Měřicí bod	p_1	ε_a	ε_b	ε_c
34	R9-2	[MPa]	[$\mu m/m$]	[$\mu m/m$]	[$\mu m/m$]
		1,80	171,67	299,75	411,48

- a) Výpočet hlavních přetvoření

$$\varepsilon_I = \frac{\varepsilon_a + \varepsilon_c}{2} + \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_a - \varepsilon_c}{2}\right)^2 + \left(\frac{2\varepsilon_b - \varepsilon_a - \varepsilon_c}{2}\right)^2} \quad 9.1$$

$$\varepsilon_I = \frac{171,67 + 411,48}{2} + \sqrt{\left(\frac{171,67 - 411,48}{2}\right)^2 + \left(\frac{2 \cdot 299,75 - 171,67 - 411,48}{2}\right)^2} = 411,76 \mu m/m \quad 9.2$$

$$\varepsilon_{II} = \frac{\varepsilon_a + \varepsilon_c}{2} - \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_a - \varepsilon_c}{2}\right)^2 + \left(\frac{2\varepsilon_b - \varepsilon_a - \varepsilon_c}{2}\right)^2} \quad 9.3$$

$$\varepsilon_{II} = \frac{171,67 + 411,48}{2} - \sqrt{\left(\frac{171,67 - 411,48}{2}\right)^2 + \left(\frac{2 \cdot 299,75 - 171,67 - 411,48}{2}\right)^2} = 171,39 \mu m/m \quad 9.4$$

- b) Výpočet hlavních napětí

$$\sigma_I = \frac{E}{1 - \mu} \cdot \frac{\varepsilon_a + \varepsilon_c}{2} + \frac{E}{\sqrt{2} \cdot (1 + \mu)} \cdot \sqrt{(\varepsilon_a - \varepsilon_b)^2 + (\varepsilon_c - \varepsilon_b)^2} \quad 9.5$$

$$\sigma_I = \frac{0,21}{1 - 0,3} \cdot \frac{171,67 + 411,48}{2} + \frac{0,21}{\sqrt{2} \cdot (1 + 0,3)} \cdot \sqrt{(171,67 - 299,75)^2 + (411,48 - 299,75)^2} = 106,89 MPa \quad 9.6$$

$$\sigma_{II} = \frac{E}{1-\mu} \cdot \frac{\varepsilon_a + \varepsilon_c}{2} - \frac{E}{\sqrt{2} \cdot (1+\mu)} \cdot \sqrt{(\varepsilon_a - \varepsilon_b)^2 + (\varepsilon_c - \varepsilon_b)^2} \quad 9.7$$

$$\sigma_I = \frac{0,21}{1-0,3} \cdot \frac{171,67+411,48}{2} - \frac{0,21}{\sqrt{2} \cdot (1+0,3)} \cdot \sqrt{(171,67 - 299,75)^2 + (411,48 - 299,75)^2} = 68,06 \text{ MPa} \quad 9.8$$

c) Výpočet úhlu α

Při výpočtu úhlu se vychází ze dvou vztahů, nejprve se musí vypočítat pomocný úhel ψ a kvadrant ve kterém se vyskytuje. A následně se vypočítá výsledný úhel α .

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{Z}{N} = \frac{2\varepsilon_b - \varepsilon_a - \varepsilon_c}{\varepsilon_a - \varepsilon_c} = \frac{2 \cdot 299,75 - 171,67 - 411,48}{171,67 - 411,48} = \frac{16,35}{-239,81} = 0,068 \text{ rad} \Rightarrow \psi = -3,9^\circ \quad 9.9$$

$$\left\{ \begin{array}{l} Z > 0(+) \\ N \leq 0(-) \end{array} \right\} \alpha = \frac{1}{2} (180^\circ - |\psi|) = \frac{1}{2} \cdot (180^\circ - |-3,9|) = 88^\circ 2', 59,5'' \quad 9.10$$

d) Výpočet redukovaného napětí

$$\sigma_{red} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1 \sigma_2} = \sqrt{106,89^2 + 68,06^2 - 106,89 \cdot 68,06} = 93,71 \text{ MPa} \quad 9.11$$

e) Výpočet prosté bezpečnosti

$$k_k = \frac{\sigma_k(R_e)}{\sigma_{red}} = \frac{260}{93,71} = 2,7 \quad 9.12$$

9.4.2 TLAKOVÉ

Soubory s daty z tlakového snímače byly načteny do programu NextView. Před načtením se provedla redukce signálu z 1 kHz na 50 Hz (nulování nebylo potřeba). Označení tlaku zůstalo původní – p_1 . Po načtení signálu byly odečteny jednotlivé hodnoty tlaku při různých provozních stavech, a ty byly posléze přepsány do Excelu, kde s nimi bylo dále pracováno.

9.4.3 OSTATNÍ

Soubor s daty výkonu, polohy kulového uzávěru (kulový uzávěr nabývá dvou hodnot: 1-otevřen a 0-zavřen) a geodetického spádu byly jako data z tlakového snímače načteny do programu NextView. Označení výkonu je P , geodetického spádu H_g a polohy kulového uzávěru KU . Hodnoty P , KU a H_g sloužily pouze pro orientaci ve výsledných grafech. Jejich absolutní hodnota není důležitá, a pro to se vyskytují pouze v grafech.

9.4.4 KOMPLEXNÍ

Pro komplexní vyhodnocení, zhodnocení všech 51 stavů a pro odečty hodnot veličiny byly vytvořeny grafy, které ukazují různé kombinace závislosti měřených veličin. Grafy, které udávají závislost přetvoření (napětí) na tlaku. A pak různé časové průběhy, kde jsou v jednom grafu zobrazeny různé veličiny (přetvoření-tlak-výkon) apod. Dále pak byly vytvořeny tabulky, ve kterých jsou vyčísleny měřené a vypočtené veličiny.

9.5 POROVNÁNÍ MĚŘENÍ TLAKU VE VODĚ S NAPJATOSTÍ VE SPIRÁLE

V první řadě je potřeba rozebrat fyzikální a technické možnosti porovnání dvou zmíněných veličin (p a σ). Po fyzikální stránce porovnáváme dvě veličiny, které si svým chováním jsou podobné a mají stejnou jednotku Pa. Rovnice tlaku se dá napsat ve tvaru, který je uveden ve vztahu 9.13 a ze kterého lze následně vyjádřit sílu, viz 9.14. Napjatost se dá vyjádřit Hookovým zákonem, který je uveden v rovnici 9.15. Hookův zákon lze také napsat ve tvaru, který je uveden v rovnici 9.16, kde F je působící síla, k_p je konstanta pružnosti materiálu a w je prodloužení materiálu. Při posouzení rovnic 9.14 a 9.16 je vidět jasná analogie mezi tlakem a napjatostí. Z těchto poznatků vyplývá, že po fyzikální stránce lze porovnávat tlak a napjatost.

$$p = \frac{F}{S} \quad 9.13$$

$$F = p \cdot S \quad 9.14$$

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad 9.15$$

$$F = -k_p \cdot w \quad 9.16$$

Posouzení porovnání tlaku s napjatostí po technické stránce je mnohem složitější než porovnání fyzikální. Aby bylo možné porovnávat dvě rozdílné měřené veličiny je nutné, aby byly dodrženy zejména tyto podmínky měření:

- 1) Měření všech veličin by mělo probíhat za stejných podmínek.
- 2) Snímače pro měřené veličiny by měly být umístěné na stejném místě.

Dále je nutno rozlišovat, jestli se měření provádí v laboratorních, anebo provozních podmínkách. V laboratořích je možné podmínky měření dodržet, kdežto u měření v provozu jsou podmínky náročnější.

V našem případě měření nenastala žádná ze zmíněných podmínek. První podmínku nám negativně ovlivňují zejména dva faktory a to hydraulický a mechanický. Hydraulický faktor je založen na teorii proudění ve spirále VT, kde lze usuzovat, že ve všech místech spirály nepanují stejné podmínky. Mechanický faktor je postaven na myšlence, že tloušťka stěny spirály není ve všech místech stejná. Druhá podmínka nebyla splněna proto, že odběrné místo pro tlakový snímač bylo umístěno na vstupu do spirály viz Obr. 9.4 a měřicí místa pro tenzometry byly rozmístěny na různých místech celé spirály viz příloha B.4.

Jako další negativní faktor, který ovlivňuje porovnání je fakt, že tlak byl měřen uvnitř spirály a napjatost na povrchu spirály.

Podle výše uvedených skutečností se může měření jevit jako obtížně porovnatelné. Ale při zhodnocení všech vlivů a za podmínky, že se k porovnání bude přistupovat s určitým technickým nadhledem lze konstatovat tyto závěry:

- Porovnání měření tlaku ve vodě s napjatosti ve spirále je možné provést, ale pouze pro časové průběhy jednotlivých veličin.
- Porovnávat absolutní naměřené hodnoty nemá vzhledem k množství negativních vlivů smysl.

Aby bylo možné porovnávat mezi sebou dvě veličiny, které byly měřeny různými snímači, je nutno během měření zajistit časovou synchronizaci mezi měřenými signály. Dále je pak vhodné, aby všechny snímače měly nastavenou stejnou vzorkovací frekvenci.

Porovnávání měření tlaku ve vodě s napjatosti na spirále proběhlo ve dvou etapách. Prvně bylo provedeno komplexní porovnání a vytipování provozních stavů. Následně se detailně analyzovaly tři vytipované provozní stavy, které jsou otevření KU, zavření KU a chod soustrojí.

a) Komplexní porovnání

Při zhodnocení všech naměřených stavů bylo zjištěno, že chování p_1 a ε (σ) je pro stejné provozní stavy vždy stejné. Viz příloha B.7.

b) Detailní analýza

V příloze B.8 jsou grafy, které zachycují detailní časové průběhy p a σ . V grafech je jasně patrné, že průběhy $p_1, \sigma_{red}, \sigma_I$ a σ_{II} jsou úplně stejné a neliší ani v detailech. Dále je v příložených grafech B.8 a B.10 vidět, že hodnoty tlaku a napětí jsou posunuty o $\Delta t = 8,4$ s. Respektive, že dynamické jevy, které byly naměřeny tlakovým snímačem předbíhají ty samé dynamické jevy, které byly naměřeny tenzometry a to o 8,4 s. Při důkladné analýze toho jevu se došlo k závěru (kontrola opakovatelnosti při stejných stavech na různých segmentech), že budou způsobeny nedostatečnou synchronizací časové základny mezi snímačem tlaku a tenzometry (tlak byl měřen ČBE a napjatost byla měřena ÚAM).

Pro úplnost byly do grafu přidány orientační hodnoty výkonu. Ale vzhledem k tomu, že hodnoty výkonu jsou snímány pouze jednou za minutu, nelze hodnoty využít pro porovnání tlaku a napjatosti.

9.6 VÝPOČET NEJISTOT MĚŘENÍ

9.6.1 NEJISTOTA TENZOMETRŮ

Jelikož se při měření nevyskytlo dostatek stavů, které by vykazovaly opakovatelnost měření, byla vyhodnocena pouze nejistota stanovená metodou B. Nejistota stanovená metodou A nebyla vyhodnocena.

Stanovení nejistoty bylo provedeno dle teorie, která je popsána v kapitole 8.

VÝPOČET NEJISTOTY PŘETVOŘENÍ

- 1) Nejistota k-faktoru tenzometru

Chyba při hodnotě k-faktoru 1,92 je $\pm 0,019$. Z toho plyne, že nejistota k-faktoru je tak malá, že se při výpočtu neuvažuje.

$$u_{\epsilon 1} = 0 \mu m/m \quad 9.17$$

- 2) Nejistota příčné deformace tenzometru

Při chybě 0,7% je zanedbatelná.

$$u_{\epsilon 2} = 0 \mu m/m \quad 9.18$$

- 3) Nejistota geometrie nalepení tenzometrů

Nejistota od vychýlení v ose x a y je zanedbatelná.

Podle kvalifikovaného úsudku bylo zvolená maximální chyba vzniklá od úhlu natočení $2 \mu m/m$.

$$u_{\epsilon 3} = \frac{z_{max}}{\chi} \cdot A_4 = \frac{2}{3} \cdot 1 = 0,67 \mu m/m \quad 9.19$$

- 4) Nejistota teplotní deformace snímače

Měření probíhalo v rozsahu teplot $5^\circ C$ až $25^\circ C$, proto maximální chyba měřené deformace uvažuje $\pm 9 \mu m/m$.

$$u_{\epsilon 4} = \frac{z_{max}}{\chi} \cdot A_4 = \frac{9}{3} \cdot 1 = 3 \mu m/m \quad 9.20$$

- 5) Nejistota hystereze

Před začátkem měřením proběhlo víc jak 10 zatěžovacích cyklů, a tudíž se předpokládá, že se hystereze ustálila na 0,1% z maximálního měřené deformace.

$$u_{\epsilon 5} = 0,29 \cdot \delta_z \cdot A_5 = 0,29 \cdot 0,423 \cdot 1 = 0,13 \mu m/m \quad 9.21$$

- 6) Nejistota geometrie kvality povrchu

Na základě kvality obroušené plochy se zvolila maximální chyba $1 \mu m/m$.

$$u_{\epsilon 6} = \frac{z_{max}}{\chi} \cdot A_6 = \frac{1}{1,7} \cdot 1 = 0,58 \mu m/m \quad 9.22$$

7) Nejistota lepidla

Při měření bylo použito lepidlo X60 a proběhly víc jak 3 zatěžovací cykly. Z toho plyne, že standartní nejistota je $1 \mu\text{m}/\text{m}$.

$$u_{\varepsilon 7} = u_7 \cdot A_7 = 1 \cdot 1 = 1 \mu\text{m}/\text{m} \quad 9.23$$

8) Nejistota kabelu propojující tenzometr s ústřednou

Po zvážení všech rušivých elementů, které mohly vstoupit do chyby kabelu. Byla zvolena standartní nejistota $5 \mu\text{m}/\text{m}$. V našem případě je třeba brát v potaz, že se měřilo v elektrárně, kde se obecně vyskytuje řada negativních elektrických vlivů.

$$u_{\varepsilon 8} = u_8 \cdot A_8 = 5 \cdot 1 = 5 \mu\text{m}/\text{m} \quad 9.24$$

9) Nejistota měřicí ústředny

Při měření byla použita měřicí ústředna EMS DV 803. Výrobce udává, že chyba je lepší než $\pm 1\%$ (pro plný rozsah a provozní teplotu). Nejistota měřicí ústředny v sobě zahrnuje chyby všech použitých součástek. viz Obr. 4.7

$$u_{\varepsilon 9} = \frac{z_{\max}}{\chi} \cdot A_9 = \frac{30}{3} \cdot 1 = 10 \mu\text{m}/\text{m} \quad 9.25$$

10) Nejistota kabelu propojující měřicí ústřednu s PC

$$u_{\varepsilon 10} = 0 \mu\text{m}/\text{m} \quad 9.26$$

Nejistota přetvoření - $u_{B\varepsilon}$

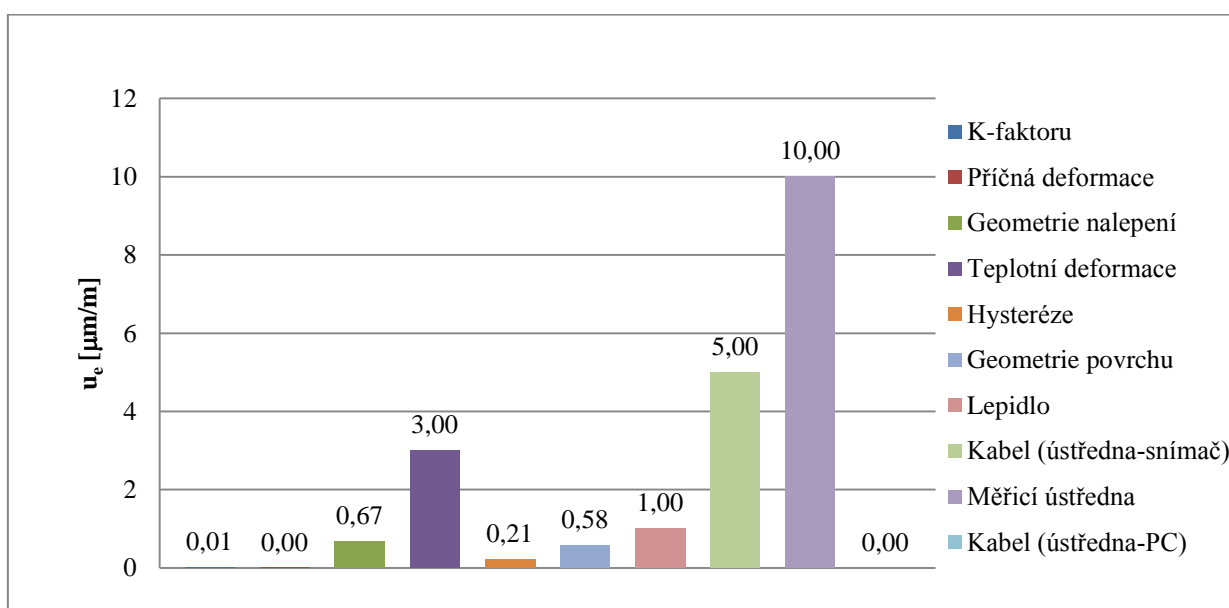
$$u_{B\varepsilon} = \sqrt{u_{\varepsilon 1}^2 + u_{\varepsilon 2}^2 + u_{\varepsilon 3}^2 + u_{\varepsilon 4}^2 + u_{\varepsilon 5}^2 + u_{\varepsilon 6}^2 + u_{\varepsilon 7}^2 + u_{\varepsilon 8}^2 + u_{\varepsilon 9}^2 + u_{\varepsilon 10}^2} \quad 9.27$$

$$u_{B\varepsilon} = \sqrt{0^2 + 0^2 + 0,67^2 + 3^2 + 0,13 + 0,58^2 + 1^2 + 5^2 + 10^2 + 0^2} \quad 9.28$$

$$u_{B\varepsilon} = \pm 11,65 \mu\text{m}/\text{m} \quad 9.29$$

Tab. 9.5: Bilanční tabulka nejistot měření přetvoření

Veličina	Odhad	Standartní nejistota	Typ rozdělení	Citlivostní koeficient	Příspěvek ke standartní nejistotě
X_i	x_i	$u(x_i)$	χ	A_i	$u_i(y)$
	$[\mu\text{m/m}]$	$[\mu\text{m/m}]$	$[-]$	$[-]$	$[\mu\text{m/m}]$
K - faktor	0,02	0,01	Rovnoměrné	1	0,00
Příčná deformace	0,01	0,00	Rovnoměrné	1	0,00
Geometrie nalepení	2	0,67	Normální	1	0,67
Teplotní deformace	9	3	Normální	1	3,00
Hystereze	0,424	0,13		1	0,13
Geometrie povrchu	1	0,58	Rovnoměrné	1	0,58
Lepidlo		1,00		1	1,00
Kabel (ústředna snímač)		5,00		1	5,00
Měřicí ústředna	30	10,00	Normální	1	10,00
Kabel (ústředna PC)	0			1	0,00
Nejistota $u(\varepsilon)$ $[\mu\text{m/m}]$					$\pm 11,65$

Graf 9.1: Grafické vyjádření složek nejistot $u_{B\varepsilon}$

VÝPOČET NEJISTOTY HLAVNÍCH NAPĚTÍ A REDUKOVANÉHO NAPĚTÍ

Rozbor výpočtu nejistoty měření napětí je detailně proveden pouze pro měřený stav 34 a měřicí bod R9-2. Správně by měl být rozbor proveden pro všechny naměřené hodnoty, ale vzhledem k rozsáhlosti naměřených dat není možné dělat rozbor výpočtu nejistoty měření pro všechny měřené stavy.

Tab. 9.6: Hodnoty pro rozbor výpočtu nejistoty měření

Stav	Měřicí bod	p_I	ε_I	ε_{II}	σ_I	σ_{II}	σ_{red}
34	R9-2	[MPa]	[$\mu\text{m}/\text{m}$]	[$\mu\text{m}/\text{m}$]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
		1,80	411,76	171,39	106,89	68,06	93,71

Nejistota hlavních napětí - $u_{B\sigma}$

- Výpočet složek celkové standardní nejistoty**

a) Nejistota přetvoření - $u_{B\varepsilon}$

$$u_{\varepsilon} = 11,65 \mu\text{m}/\text{m}$$

$$u_{B\varepsilon}(\sigma_I, \sigma_{II}) = u_{\varepsilon} \cdot A_{\varepsilon} = u_{\varepsilon} \cdot \frac{E}{1 - \mu} = 11,65 \cdot \frac{210\,000}{1 - 0,3} \cdot 10^{-6} = 3,50 \text{ MPa} \quad 9.30$$

b) Nejistota modulu pružnosti - u_{BE}

Chyba modulu pružnosti se uvažuje 10% a použije se normální rozdělení pravděpodobnosti.

$$u_{BE}(\sigma_I) = \frac{z_{max}}{\chi} \cdot A_E = \frac{z_{max}}{\chi} \cdot \frac{\varepsilon_I}{1 - \mu} = \frac{21000}{3} \cdot \frac{411,76}{1 - 0,3} \cdot 10^{-6} = 4,12 \text{ MPa} \quad 9.31$$

$$u_{BE}(\sigma_{II}) = \frac{z_{max}}{\chi} \cdot A_E = \frac{z_{max}}{\chi} \cdot \frac{\varepsilon_{II}}{1 - \mu} = \frac{21000}{3} \cdot \frac{171,39}{1 - 0,3} \cdot 10^{-6} = 1,71 \text{ MPa} \quad 9.32$$

c) Nejistota Poissonovi konstanty - $u_{B\mu}$

Chyba Poissonovi konstanty se uvažuje 10% a použije se normální rozdělení pravděpodobnosti.

$$u_{B\mu}(\sigma_I) = \frac{z_{max}}{\chi} \cdot A_{\mu} = \frac{z_{max}}{\chi} \cdot \frac{\varepsilon_I \cdot E}{(1 - \mu)^2} = \frac{0,03}{3} \cdot \frac{411,76 \cdot 210000}{(1 - 0,3)^2} \cdot 10^{-6} = 1,76 \text{ MPa} \quad 9.33$$

$$u_{B\mu}(\sigma_{II}) = \frac{z_{max}}{\chi} \cdot A_{\mu} = \frac{z_{max}}{\chi} \cdot \frac{\varepsilon_{II} \cdot E}{(1 - \mu)^2} = \frac{0,03}{3} \cdot \frac{171,39 \cdot 210000}{(1 - 0,3)^2} \cdot 10^{-6} = 0,73 \text{ MPa} \quad 9.34$$

- Výpočet celková standartní nejistoty

$$u_{B\sigma_I} = \sqrt{u_{B\varepsilon}^2 + u_{BE}^2 + u_{B\mu}^2} = \sqrt{3,50^2 + 4,12^2 + 1,76^2} \quad 9.35$$

$$u_{B\sigma_I} = \pm 5,68 \text{ MPa} \quad 9.36$$

$$u_{B\sigma_{II}} = \sqrt{u_{B\varepsilon}^2 + u_{BE}^2 + u_{B\mu}^2} = \sqrt{3,50^2 + 1,71^2 + 0,73^2} \quad 9.37$$

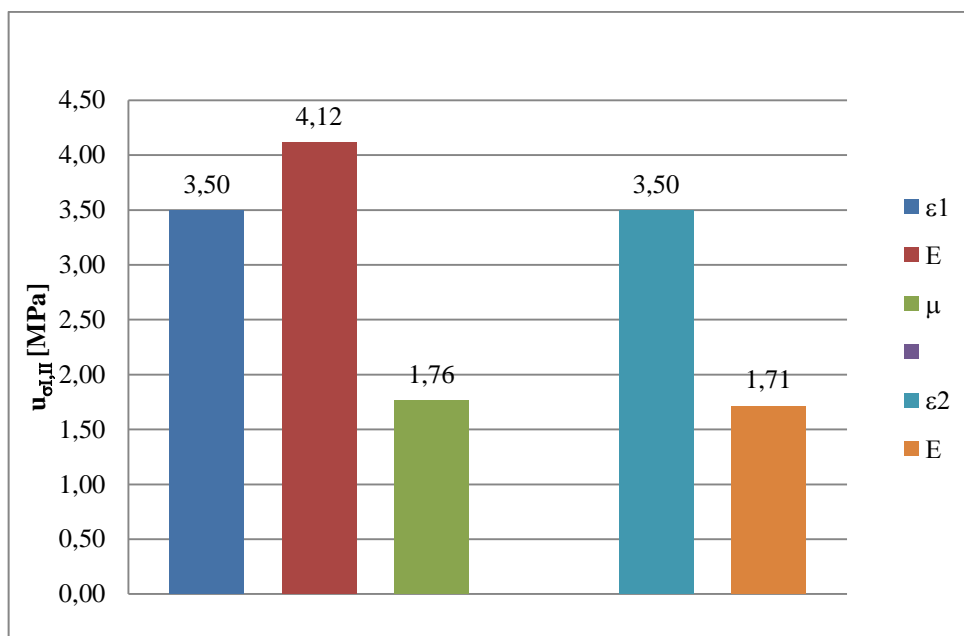
$$u_{B\sigma_{II}} = \pm 3,96 \text{ MPa} \quad 9.38$$

Tab. 9.7: Bilanční tabulka nejistot měření napětí σ_I

Veličina	Odhad	Standartní nejistota	Citlivostní koeficient	Příspěvek ke standartní nejistotě
X_i	x_i	$u(x_i)$	A_i	$u_i(\sigma_I)$
ε	-	11,65 $\mu\text{m/m}$	300000 MPa/ $\mu\text{m/m}$	3,50 MPa
E	10 [%]	7000 MPa	588,23	4,12 MPa
μ	10 [%]	0,01	176468571 MPa	1,76 MPa
Nejistota $u(\sigma_I)$ [MPa]				$\pm 5,68$

Tab. 9.8: Bilanční tabulka nejistot měření napětí σ_{II}

Veličina	Odhad	Standartní nejistota	Citlivostní koeficient	Příspěvek ke standartní nejistotě
X_i	x_i	$u(x_i)$	A_i	$u_i(\sigma_{II})$
ε	-	11,65 $\mu\text{m/m}$	300000 MPa/ $\mu\text{m/m}$	3,50 MPa
E	10 [%]	7000 MPa	244,84	1,71 MPa
μ	10 [%]	0,01	73452857 MPa	0,73 MPa
Nejistota $u(\sigma_{II})$ [MPa]				$\pm 3,96$

Graf 9.2: Grafické vyjádření složek nejistoty $u_{\sigma_{I,II}}$ **Nejistota redukovaného napětí - $u_{B\sigma red}$** • **Výpočet složek celkové standardní nejistoty**

- a) Nejistota napětí σ_I - $u_{B\sigma I}$
 $u_{\sigma I} = 5,68 \text{ MPa}$

$$u_{\sigma_I}(\sigma_{red}) = u_{\sigma} \cdot A_{\sigma} = u_{\sigma_I} \cdot \frac{2 \cdot \sigma_I \cdot \sigma_{II}}{2 \cdot \sqrt{\sigma_I^2 + \sigma_{II}^2} - \sigma_I \cdot \sigma_{II}} \quad 9.39$$

$$u_{\sigma_I}(\sigma_{red}) = 5,68 \cdot \frac{2 \cdot 106,89 \cdot 68,06}{2 \cdot \sqrt{106,89^2 + 68,06^2} - 106,89 \cdot 68,06} = 4,42 \text{ MPa} \quad 9.40$$

- b) Nejistota napětí σ_{II} - $u_{B\sigma II}$
 $u_{\sigma II} = 3,96 \text{ MPa}$

$$u_{\sigma_{II}}(\sigma_{red}) = u_{\sigma} \cdot A_{\sigma} = u_{\sigma_{II}} \cdot \frac{2 \cdot \sigma_I \cdot \sigma_{II}}{2 \cdot \sqrt{\sigma_I^2 + \sigma_{II}^2} - \sigma_I \cdot \sigma_{II}} \quad 9.41$$

$$u_{\sigma_{II}}(\sigma_{red}) = 3,96 \cdot \frac{2 \cdot 106,89 \cdot 68,06}{2 \cdot \sqrt{106,89^2 + 68,06^2} - 106,89 \cdot 68,06} = 0,62 \text{ MPa} \quad 9.42$$

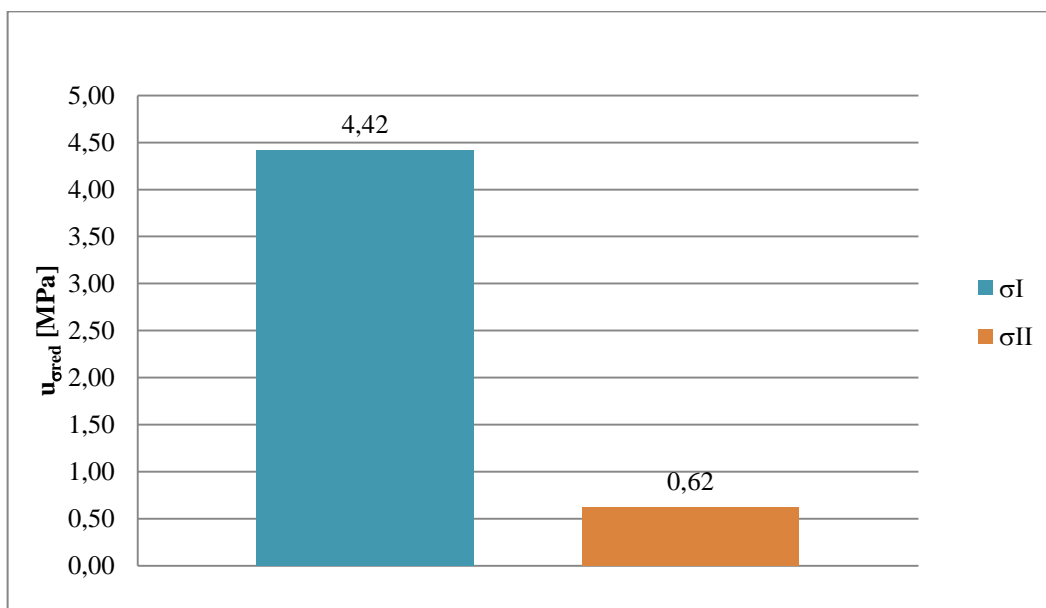
- Výpočet celková standardní nejistoty

$$u_{B\sigma_{red}} = \sqrt{u_{B\sigma_I}^2 + u_{B\sigma_{II}}^2} = \sqrt{4,42^2 + 0,62^2} \quad 9.43$$

$$u_{B\sigma_{red}} = \pm 4,46 \text{ MPa} \quad 9.44$$

Tab. 9.9: Bilanční tabulka nejistot měření redukovaného napětí σ_{red}

Veličina	Odhad	Standardní nejistota	Citlivostní koeficient	Příspěvek ke standardní nejistotě
X_i	x_i	$u(x_i)$	A_i	$u_i(\sigma_{red})$
σ_I	-	5,68 MPa	0,78	4,42 MPa
σ_{II}	-	3,96 MPa	0,16	0,62 MPa
Nejistota $u(\sigma_{red})$ [MPa]				$\pm 4,46$



Graf 9.3: Grafické vyjádření složek nejistoty $u_{b\sigma_{red}}$

VÝPOČET STANDARTNÍ ROZŠÍŘENÁ NEJISTOTY MĚŘENÍ

Standartní rozšířená nejistota přetvoření

$$U_{\varepsilon} = k \cdot u_{B\varepsilon} = 2 \cdot \pm 11,65 = \pm 23,31 \mu\text{m/m} \quad 9.45$$

Standartní rozšířená nejistota napětí

$$U_{\sigma_I} = k \cdot u_{B\sigma_I} = 2 \cdot \pm 5,68 = \pm 11,36 \text{ MPa} \quad 9.46$$

$$U_{\sigma_{II}} = k \cdot u_{B\sigma_{II}} = 2 \cdot \pm 3,96 = \pm 7,92 \text{ MPa} \quad 9.47$$

$$U_{\sigma_{red}} = k \cdot u_{B\sigma_{red}} = 2 \cdot \pm 4,46 = \pm 8,92 \text{ MPa} \quad 9.48$$

Uvedená rozšířená nejistota měření je součinem standartní nejistoty měření a koeficientu rozšíření $k=2$, což pro normální rozdělení odpovídá pravděpodobnosti pokrytí cca 95%. Standartní nejistota měření byla určena v souladu s dokumentem EA 4/02.

9.6.2 NEJISTOTA OSTATNÍCH VELIČIN

Nejistoty ostatních veličin, zejména pak snímače tlaku se nepočítaly a to z důvodu, že pro výpočet nejsou k dispozici dostatečné informace o snímačích.

9.7 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ

- Velikost napětí na spirále není závislé na výkonu soustrojí, otevření RK a dalších veličinách, ale je dáno pouze tlakem vody, který se vyskytuje uvnitř spirály. Viz graf B.11, B.12, B.13, B.14, B.15 a B.16.
- Největší napětí na spirále se vyskytuje při poruchovém odstavení (zavření KU) soustrojí.
- Největší naměřené napětí se vyskytovalo na měřicím bodě R9-2 (segment číslo 9). Absolutní hodnota největšího měřeného napětí je $\sigma_{red}=93,71 \text{ MPa}$. Viz graf: B.5 a B.6.
- Všechny naměřené hodnoty napětí jsou v tlaku, kromě hodnoty napětí σ_{II} na měřicím bodě R2-1 (segment číslo 1), který je v tahu. Viz graf: B.5.
- Na naměřených hodnotách tlaku p_1 je vidět, že hodnota je téměř konstantní pro stejné provozní stavy a dále je patrné, že hodnota p_1 klesá zároveň s hodnotou H . viz graf B.7
- Při chodu soustrojí je tlak uvnitř spirály a z toho plynoucí napětí na spirále přibližně konstantní. Během měření se projevil trend snižování napětí, který je dán poklesem spádu na turbínu. Viz graf B.5, B.6.
- Během celého měření se zmenšila hodnota H o 2,9m. Viz graf B.2.
- Celková standartní rozšířená nejistota přetvoření (U_{ε}) a napětí (U_{σ_I} , $U_{\sigma_{II}}$, $U_{\sigma_{red}}$), která byla stanovena na základě všech dostupných informací vyhovuje pro daný typ měření.
- Minimální koeficient bezpečnosti, který se byl vypočítán z nejvyššího naměřeného redukovaného napětí, neklesl pod hodnotu $k_k=2,7$. Tento výsledek plně odpovídá charakteru typu měření a zvoleným místům na spirále, kde byly umístěny tenzometry.
- Ve zprávě [25] je provedeno srovnání vypočtených a naměřených hodnot napětí v 10 bodech pro provozní stav poruchového odstavení. Rozdíl naměřených a vypočtených napětí je ve většině případů menší než 10 MPa až na rozdíl 30 MPa u tenzometru R9-1, kde však není zřejmé, proč k takovému rozdílu došlo.

10 MĚŘENÍ NA SPIRÁLE PO GENERÁLNÍ OPRAVĚ

Cílem měření bylo určení napjatosti ve vybraných místech spirály při různých provozních stavech. Na základě měření bude vytvořen podklad pro srovnání napjatosti před a po generální opravě. Dále budou naměřená data porovnána s daty, které byly naměřeny při tlakové zkoušce a s pevnostním výpočtem. Měření probíhalo v květnu 2014 a bylo souběžné se zkouškami při uvádění do provozu, které prováděl výrobce.

10.1 ZÁKLADNÍ TECHNICKÁ DATA

10.1.1 PARAMETRY

Tab. 10.1: Základní technické parametry turbíny po GO [27]

Výrobce	ČKD Blansko Engineering, a.s.
Rok výroby	2012 - 2013
Typ turbíny	F20
Max. spád turbíny	H=164 m
Max. Výkon	P=67 MW
Průtok turbínou	Q=46 m ³ /s
Průměr oběžného kola	D= 2150 mm
Počet rozváděcích lopatek	Z _{rozv} = 20
Počet oběžných lopatek	Z _{ob} = 17
Provozní otáčky	n=375 min ⁻¹
Průběžné ustálené otáčky	n _{zv} = 730 min ⁻¹

10.1.2 SPIRÁLNÍ SKŘÍŇ

Spirální skříň je svařenec spirály, lopatkových kruhů a předrozdávěcích lopatek. Z montážních důvodů byla rozdělena do tří sekcí, které byly svařeny na místě montáže. Spirální skříň byla žíhána k odstranění vnitřního pnutí a to prvně ve výrobním závodě (ČKD Blansko) a dále po montáži na díle. Spodní část spirály je zabetonovaná. Svařovaná konstrukce spirály je dimenzována na provozní tlak 1,65 MPa při zkušebním tlaku 3,15 MPa (tlaková zkouška proběhla na díle dne 21. 06. 2013 po dobu 30 minut). [27] [38] [39]



Obr. 10.1: Tlaková zkouška spirální skříně [38]



Obr. 10.2: Smontovaná a zabetonovaná spirální skříně [39]

Tab. 10.2: Mechanické vlastnosti použitých materiálu na výrobu spirální skříně [7] [27]

Díl	Spirála	Lopatkový kruh	Předrozdávěcí lopatka
Ocel	P355NL1	S355J2	S355N
t [mm]	30	180	80
R _e [MPa]	355	285	325
R _m [MPa]	490-630	450-600	470-630
Norma	ČSN EN 10028-3	ČSN EN 10025-3	ČSN EN 10025-3

OCEL P355NL1 (11 503)

Svařitelná jemnozrnná konstrukční jakostní ocel nelegovaná se zaručenou houževnatostí při nízkých teplotách. Je určena pro výrobu plochých a dlouhých výrobků používaných pro konstrukci tlakových nádob. Vhodné pro snížené atmosférické teploty pod -20 °C. Vhodná ke svařování. [7]

OCEL S355J2 (1.0577)

Konstrukční jakostní ocel nelegovaná vhodná ke svařování. [7]

OCEL S355N (1.0545)

Svařitelná jemnozrnná konstrukční ocel. Dodává se jako plechy, pásy nebo dlouhé výrobky válcované za tepla. Jsou určené pro vysoce namáhané svařované konstrukce např. mosty, vrata plavebních komor, zásobníky, nádrže na vodu (na svařované ocelové konstrukce pracující i za snížených teplot). Oceli jsou mikrolegované niobem, vandem, titanem. Vyšších pevnostních hodnot se dosahuje tepelným nebo termomechanickým zpracováním. [7]

Tab. 10.3: Nezávislé materiálové vlastnosti použitých materiálů

E [MPa]	200 000
μ [-]	0,3

10.2 POPIS ZKOUŠEK

Zkoušky proběhly na základě objednávky mezi ÚAM Brno, s.r.o. a ČEZ, a.s. Vodní elektrárny se sídlem ve Štěchovicích. Zakázka s označením „Měření na nové spirále TG2 VE Lipno I“ byla úspěšně dokončena v květnu 2014 a komplexní výsledky z měření jsou uvedeny v literatuře [23].

10.2.1 ČASOVÝ HARMONOGRAM A PERSONÁLNÍ OBSAZENÍ ZKOUŠEK

Všechny přípravné práce i měření probíhalo v součinnosti techniků ÚAM Brno, ČKD Blansko Engineering a ČEZ. Přípravné práce probíhaly 20. 5. 2014 a měření 21. 5. 2014.

Za ÚAM Brno se na měření podíleli: Ing. Milan Valenta, Bc. Pavel Dokoupil, Miroslav Sehnal a vyhodnocení prováděl Bc. Pavel Dokoupil.

Za ČKD Blansko Engineering se zkoušek zúčastnili p. Buček a za ČEZ p. Smítka.

10.2.2 ROZMÍSTĚNÍ SNÍMAČŮ

Celkem bylo na spirálu nainstalováno 11 tenzometrických pravoúhlých růžic (typ: HBM - 6/120 RY 11) ve třech rovinách a na 5 segmentů spirály (na segmentech spirály 0 a 15 byl tenzometr jenom v jedné rovině). Umístění snímačů bylo voleno tak, aby naměřené hodnoty:

- postihly napjatost na celém povrchu spirály,
- obsahovaly místa, kde se předpokládá největší možné napětí na povrchu spirály,
- bylo možné porovnat z měření při tlakové zkoušce viz [28],
- bylo možné porovnat s měření před GO viz [22],
- bylo možné porovnat s pevnostním výpočtem viz [27].

Schéma rozmístění snímačů je v příloze C.4.

10.2.3 FOTODOKUMENTACE



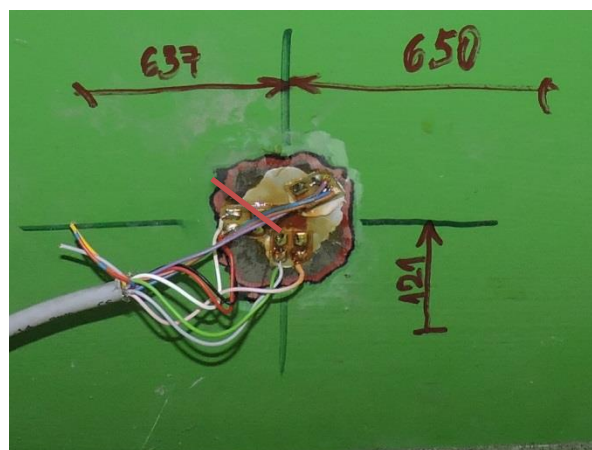
Obr. 10.3 Pohled na měřenou spirálu



Obr. 10.4: Pohled na kulový uzávěr (otevřený)



Obr. 10.5: Pohled na umístění tenzometru (směry růžice) – umístění 1-1



Obr. 10.6: Pohled na tenzometrickou růžici (detail) – vybraný tenzometr



Obr. 10.7: Pohled spirálu a tlakový odběr



Obr. 10.8: Pohled na tlakový odběr (sběrné potrubí) a snímač tlaku

10.3 ROZBOR MĚŘENÍ

10.3.1 POPIS MĚŘENÝCH STAVŮ

Celá zkouška spočívala v měření při určitých stavech soustrojí. Během měření se vyskytlo větší množství provozních stavů soustrojí. Z naměřených hodnot bylo na základě dřívějšího měření vybráno 10 stavů, které byly následně vyhodnoceny. Označení provozních stavů je v příloze C.5 a v Tab. 10.4.

Tab. 10.4: Přehled vybraných stavů během zkoušek

1	11:22:00 – 11:31:21	soustrojí stojí
2	11:31:22 – 11:34:30	otevření KU – najetí soustrojí na P=35MW
3	11:34:30 - 11:36:47	provoz soustrojí P=35 MW
4	13:52:00 – 13:53:13	provozní odstavení soustrojí – zavření KU
5	14:21:06 – 14:21:33	otevření KU – zavření KU
6	14:21:34 – 14:48:08	soustrojí stojí
7	14:57:20 – 15:00:00	otevření KU – najetí soustrojí na P=10MW
8	15:01:00 – 15:05:40	provoz soustrojí P=10 MW
9	15:10:20 – 15:14:30	provoz soustrojí P=60 MW
10	15:14:40 – 15:15:03	simulace poruchového odstavení soustrojí

- a) Soustrojí stojí
Soustrojí není v chodu. Kulový uzávěr je uzavřený. Ze spirály postupně odtéká voda. Tlak ve spirále je nulový (respektive tlak ve spirále je pouze od zbytku vody ve spirále).
- b) Otevření KU
Před otevřením kulového uzávěru se spirála napustí obtokem vodou. Pak se postupně otevře kulový uzávěr a na spirálu začne působit tlak p_2 . Tlak je roven hodnotě $(H - Y_z)$. Kde Y_z jsou místní ztráty, které jsou součtem ztrát ve vstupu, výstupu a přivaděči. Rozvaděč je zavřený.
- c) Provoz soustrojí.
Kulový uzávěr je otevřený, na spirálu působí tlak o velikosti p_2 . Poloha regulačního kruhu dle požadovaného výkonu soustrojí.
- d) Najetí (přejetí).
Při najetí se začne soustrojí otáčet na jmenovité otáčky a mění se poloha regulačního kruhu
- e) Provozní odstavení soustrojí (zavření KU)
Postupně se začne zavírat rozvaděč a kulový uzávěr. Ve spirále zůstává zbytek vody, která nestačí odtéct. Tlak ve spirále je nulový (respektive tlak ve spirále je pouze od zbytku vody ve spirále).

- f) Simulace poruchového odstavení soustrojí
Během provozu soustrojí se plně zavře rozvaděč. Tímto dojde ke skokovému nárůstu tlaku ve spirále až na hodnotu, která se vyskytuje při poruchovém odstavení. Zavření rozvaděče trvá cca 8 sekund. Při poruchovém odstavení turbíny se KU zavře do cca 10 sekund.

Poznámka: Stav, kdy je spirála po GO plně bez vody je stejný jako před GO. Popis tohoto stavu je v kapitole 9.3.1.

10.3.2 TENZOMETRICKÉ MĚŘENÍ

Instalace tenzometrických snímačů byla provedena pomocí postupu stanoveného výrobcem snímačů firmy HBM. Parametry použitých snímačů (kopie výrobní dokumentace) jsou uvedeny v příloze C.1. O instalaci tenzometrických snímačů byl vypracován protokol, který je uveden v příloze C.2.

Postup instalace tenzometrických snímačů:

- g) Označení míst pro nalepení tenzometrů (vyznačení směrů tenzometru a, b, c).
- h) Nalepení tenzometrů a 1. elektrická kontrola (pro nalepení bylo použito dvousložkové lepidlo X60) celý proces lepení je popsán v kapitole 5.5.
- i) Připojení tenzometrů ke kabelům a 2. elektrická kontrola.
- j) Natření tenzometrů polyuretanovým lakem PU 120.
- k) Zapojení kabelů do měřicí ústředny (EMS DV 803).
- l) Nastavení měření v programu Monitor 5.4.4. – EMS Brno – finální kontrola všech tenzometrů.

Během měření byla data ze všech tenzometrů ukládána do vnitřní FLASH paměti měřicí ústředny frekvencí 400 Hz a současně byly on-line přenášeny do nadřazeného počítače.

Po měření byla všechna data vyexportována do formátu *.txt pro další práci.

10.3.3 MĚŘENÍ TLAKU

Tlak ve spirále byl měřen relativním snímačem tlaku VTS Zlín PP5 s rozsahem 0-5 MPa s třídou přesnosti 0,5. Kalibrace tlakového snímače proběhla před a po měření. Výsledky kalibrace jsou uvedeny v příloze C.3. Snímač byl zapojen do měřicí ústředny EMS DV 803, ale do jiné sekce než tenzometry. Snímač tlaku byl připojen v místě připojení kontrolního manometru. Viz Obr. 10.8.

Poznámka: Měrný člen tlakoměr je z polovodičového tenzometru viz kapitoly 6.3.1 a 5.3.2.

10.3.4 MĚŘENÍ OSTATNÍCH VELIČIN

Hodnoty výkonu a spádu byly dodány z centrálního dispečinku vodních elektráren ve Štěchovicích. Hodnoty byly ve formátu *.txt a byly v minutových intervalech (veličiny jsou statické – z toho plyne, že minutový interval je naprosto dostačující). Snímače ani kalibrační listy od snímačů nebyly dodány (pro vyhodnocení nejsou tato data důležitá) a hodnoty jsou pouze orientační.

10.4 VÝSLEDKY MĚŘENÍ

10.4.1 TENZOMETRICKÉ

Ze všech tenzometrů je pořízen kontinuální digitální záznam. Z tenzometrických růžic (tenzometry a, b, c) byly vypočteny hlavní přetvoření, hlavní napětí, úhel mezi tenzometrem a a hlavním napětím, respektive přetvoření viz 5.4.2. Dále byly vypočtené redukovaná napětí a to podle metody HMM viz 3.3. E , μ a R_e se pro výpočet použil z materiálového listu viz Tab. 10.3.

Na základě druhu měření a všech výsledků σ_{red} byla prostá bezpečnost spočtena pro největší hodnotu σ_{red} . Vzhledem k tomu, že je pro maximální redukované napětí $k_k=2,9$, nebude u dalších stavů prostá bezpečnost vůbec počítána.

Nulová hodnota pro tenzometry je stav, kdy byla spirála napuštěna vodou. Pravá nulová hodnota by nastala, pokud by byla spirála zcela bez vody. Tento stav je možné navodit, avšak během měření nenastal a předpokládá se, že chyba způsobená tímto stavem je téměř minimální.

Znaménková konvence je následující + značí tah a – značí tlak.

Během zkoušek měřili všechny tenzometry korektně.

Vyhodnocení proběhlo obdobně jako při měření před GO. Viz kapitola 9.4.1.

Poznámky k vyhodnocení:

- a) Nulování tenzometrů proběhlo před spuštěním měření.
- b) Během měření se vyskytlo silné rušení (parazitní vlivy) na 50, 100 a 150 Hz. Všechny tyto složky signálu byly odfiltrovány.

UKÁZKA VÝPOČTU HLAVNÍCH PŘETVOŘENÍ, NAPĚTÍ, REDUKOVANÉHO NAPĚTÍ A PROSTÉ BEZPEČNOSTI

Rozbor výpočtu přetvoření a napětí je proveden pro měřený stav 11 a měřicí bod 6-1. Tento stav byl zvolen na základě velikosti redukovaného napětí, (v tomto stavu je největší σ_{red} ze všech stavů a měřicích bodů).

Výpočet byl proveden dle teorie pro tenzometrické růžice, která je popsána v kapitole 5.4.2. Hodnoty E a μ viz Tab. 10.3 a R_e viz Tab. 10.2.

Tab. 10.5: Hodnoty pro výpočet hlavních přetvoření, napětí a redukovaného napětí

Stav	Měřicí bod	p_1	ε_a	ε_b	ε_c
10	6-1	[MPa]	[$\mu m/m$]	[$\mu m/m$]	[$\mu m/m$]
		1,93	164,16	357,29	587,98

a) Výpočet hlavních přetvoření

$$\varepsilon_I = \frac{\varepsilon_a + \varepsilon_c}{2} + \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_a - \varepsilon_c}{2}\right)^2 + \left(\frac{2\varepsilon_b - \varepsilon_a - \varepsilon_c}{2}\right)^2} \quad 10.1$$

$$\varepsilon_I = \frac{164,16 + 587,98}{2} + \sqrt{\left(\frac{164,16 - 587,98}{2}\right)^2 + \left(\frac{2 \cdot 357,29 - 164,16 - 587,98}{2}\right)^2} = 588,81 \mu m/m \quad 10.2$$

$$\varepsilon_{II} = \frac{\varepsilon_a + \varepsilon_c}{2} - \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_a - \varepsilon_c}{2}\right)^2 + \left(\frac{2\varepsilon_b - \varepsilon_a - \varepsilon_c}{2}\right)^2} \quad 10.3$$

$$\varepsilon_{II} = \frac{164,16 + 587,98}{2} - \sqrt{\left(\frac{164,16 - 587,98}{2}\right)^2 + \left(\frac{2 \cdot 357,29 - 164,16 - 587,98}{2}\right)^2} = 163,33 \mu m/m \quad 10.4$$

b) Výpočet hlavních napětí

$$\sigma_I = \frac{E}{1 - \mu} \cdot \frac{\varepsilon_a + \varepsilon_c}{2} + \frac{E}{\sqrt{2} \cdot (1 + \mu)} \cdot \sqrt{(\varepsilon_a - \varepsilon_b)^2 + (\varepsilon_c - \varepsilon_b)^2} \quad 10.5$$

$$\sigma_I = \frac{0,20}{1 - 0,3} \cdot \frac{164,16 + 587,98}{2} + \frac{0,2}{\sqrt{2} \cdot (1 + 0,3)} \cdot \sqrt{(164,16 - 357,29)^2 + (587,98 - 357,29)^2} = 140,18 MPa \quad 10.6$$

$$\sigma_{II} = \frac{E}{1 - \mu} \cdot \frac{\varepsilon_a + \varepsilon_c}{2} - \frac{E}{\sqrt{2} \cdot (1 + \mu)} \cdot \sqrt{(\varepsilon_a - \varepsilon_b)^2 + (\varepsilon_c - \varepsilon_b)^2} \quad 10.7$$

$$\sigma_{II} = \frac{0,2}{1 - 0,3} \cdot \frac{164,16 + 587,98}{2} - \frac{0,2}{\sqrt{2} \cdot (1 + 0,3)} \cdot \sqrt{(164,16 - 357,29)^2 + (587,98 - 357,29)^2} = 74,72 MPa \quad 10.8$$

c) Výpočet úhlu α

Při výpočtu úhlu se vychází ze dvou vztahů, nejprve se musí vypočítat pomocný úhel ψ a kvadrant ve kterém se vyskytuje. A následně se vypočítá výsledný úhel α .

$$tg\psi = \frac{Z}{N} = \frac{2\varepsilon_b - \varepsilon_a - \varepsilon_c}{\varepsilon_a - \varepsilon_c} = \frac{2 \cdot 357,29 - 164,16 - 587,98}{164,16 - 587,98} = \frac{-37,57}{-423,81} = 0,089 \text{ rad} \Rightarrow \psi = 5,1^\circ \quad 10.9$$

$$\left\{ \begin{array}{l} Z \leq 0(-) \\ N < 0(-) \end{array} \right\} \alpha = \frac{1}{2} (180^\circ + |\psi|) = \frac{1}{2} \cdot (180^\circ + |5,1|) = 92^\circ 31', 58,8'' \quad 10.10$$

d) Výpočet redukovaného napětí

$$\sigma_{red} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1 \sigma_2} = \sqrt{140,18^2 + 74,72^2 - 140,18 \cdot 74,72} = 121,49 \text{ MPa} \quad 10.11$$

e) Výpočet prosté bezpečnosti

$$k_k = \frac{\sigma_k(R_e)}{\sigma_{red}} = \frac{355}{121,49} = 2,9 \quad 10.12$$

10.4.2 TLAKOVÉ

Z tlakového snímače je pořízen kontinuální digitální záznam. Frekvence snímání byla nastavena stejná jako u tenzometrů a to 400 Hz. Postup vyhodnocení je stejný jako u tenzometrů (export, filtrace, redukce, přepočet apod.). Oproti tenzometrickému měření se musí navíc provést přepočet (kalibrace) ze snímané jednotky tlaku v mV na požadovanou jednotku tlaku v MPa. Označení tlaku p_2 . Nulová hodnota pro tlakový snímač je takový stav, kdy na snímač nepůsobí tlak vody (soustrojí stojí – zavřený KU). Před měřením byla provedena korekce na atmosférický tlak, která byla dále zohledněna při kalibraci.

10.4.3 OSTATNÍ

Soubor s daty výkonu a spádu byly načteny do programu NextView. Označení výkonu je P a spádu H.

10.4.4 KOMPLEXNÍ

Pro komplexní vyhodnocení byly vytvořeny grafy, které ukazují různé kombinace závislosti měřených veličin. Grafy, které udávají závislost přetvoření (napětí) na tlaku. A pak různé časové průběhy, kde jsou v jednom grafu zobrazeny různé veličiny (přetvoření-tlak-výkon) apod. Dále pak byly vytvořeny tabulky, ve kterých jsou vyčísleny měřené a vypočtené veličiny.

10.5 POROVNÁNÍ MĚŘENÍ TLAKU VE VODĚ S NAPJATOSTÍ VE SPIRÁLE

Fyzikální možnosti porovnání dvou zmíněných veličin (p a σ) jsou detailně rozebrány v kapitole 9.5 a v této kapitole nebudou dále rozebrány.

Porovnání tlaku s napjatostí po technické stránce bude vycházet z teorie, která je také popsána v kapitole 9.5, ale některé její části budou mírně upravena pro měření po GO.

Platnost dvou podmínek měření zůstává v platnosti. Hydraulický faktor první podmínky zůstává také v nezměněné podobě. U mechanického faktoru ale nastává změna. Pokud lze předpokládat, že má spirála z výroby po celém obvodu stejnou tloušťku plechu lze očekávat, že je jedno, na kterém místě spirály je tenzometr umístěný.

Druhá podmínka pravděpodobně nebyla také splněna v celém svém rozsahu, ale na obrázku Obr. 10.8 je vidět umístění tlakového snímače, který je také na vstupu do spirály, ale pro připojení takového snímače je vytvořeno sběrné potrubí tlaku. Ačkoliv není takové připojení vhodné pro dynamická měření, v našem případě takto umístěný snímač lépe reprezentuje tlak ve spirále.

Oproti měření na spirále před GO byla splněna možná nejdůležitější podmínka pro porovnání měření různými snímači. Měřené signály tenzometrů a tlakového snímače byly časově synchronizovány a všechny snímače měli nastavenou stejnou vzorkovací frekvenci.

Na základě těchto úvah bude provedeno detailní porovnání měřených signálů z tenzometrů se signálem z tlakového snímače.

V příloze C.7 jsou grafy, které zachycují detailní časové průběhy p a σ při různých provozních stavech soustrojí. V grafech je jasně patrné, že časové změny průběhu tlaku a napětí jsou naprosto totožné. V grafu C.12 je provedeno srovnání tenzometrů, které byly umístěny na různých segmentech, ale v jedné měřicí rovině spirály s tlakem. Z přiloženého grafu se dají vyčíst následující fakta.

- Doba reakce tlakového snímače a tenzometrů je přibližně stejná její hodnota je rovna $t=0,17s$.
- Napětí měřené v místech 15-2 , 11-2 a 6-2 je posunuto oproti napětí v místech 0-2 a 1-2 o $\Delta t=0,8s$. Tento časový rozdíl je zanedbatelný a nemá smysl zkoumat důvod časového posuvu.

10.6 VÝPOČET NEJISTOT MĚŘENÍ

10.6.1 NEJISTOTA TENZOMETRŮ

Jelikož se při měření nevyskytlo dostatek stavů, které by vykazovaly opakovatelnost měření, byla vyhodnocena pouze nejistota stanovená metodou B. Nejistota stanovená metodou A nebyla vyhodnocena.

Stanovení nejistoty bylo provedeno, dle teorie, která je popsána v kapitole 8.

VÝPOČET NEJISTOTY PŘETVOŘENÍ

- 1) Nejistota k-faktoru tenzometru

Chyba při hodnotě k-faktoru 1,91 je $\pm 0,019$. Z toho plyne, že nejistota k-faktoru je tak, malá že se při výpočtu neuvažuje.

$$u_{\epsilon 1} = 0 \mu m/m \quad 10.13$$

- 2) Nejistota příčné deformace tenzometru

Při chybě 0,7% je zanedbatelná.

$$u_{\epsilon 2} = 0 \mu m/m \quad 10.14$$

- 3) Nejistota geometrie nalepení tenzometrů

Nejistota od vychýlení v ose x a y je zanedbatelná.

Podle kvalifikovaného úsudku bylo zvolená maximální chyba vzniklá od úhlu natočení $5 \mu m/m$.

$$u_{\epsilon 3} = \frac{z_{max}}{\chi} \cdot A_4 = \frac{5}{3} \cdot 1 = 1,67 \mu m/m \quad 10.15$$

- 4) Nejistota teplotní deformace snímače

Měření probíhalo v rozsahu teplot $5^{\circ}C$ až $25^{\circ}C$, proto maximální chyba měřené deformace uvažuje $\pm 9 \mu m/m$.

$$u_{\epsilon 4} = \frac{z_{max}}{\chi} \cdot A_4 = \frac{9}{3} \cdot 1 = 3 \mu m/m \quad 10.16$$

- 5) Nejistota hystereze

Před začátkem měřením neproběhlo víc jak 10 zatěžovacích cyklů. Z tohoto důvodu se předpokládá, že hystereze bude 0,5% z maximálního měřené deformace.

$$u_{\epsilon 5} = 0,29 \cdot \delta_z \cdot A_5 = 0,29 \cdot 2,97 \cdot 1 = 0,89 \mu m/m \quad 10.17$$

- 6) Nejistota geometrie kvality povrchu

Na základě kvality obroušené plochy se zvolila maximální chyba $2 \mu m/m$.

$$u_{\epsilon 6} = \frac{z_{max}}{\chi} \cdot A_6 = \frac{2}{1,7} \cdot 1 = 1,15 \mu m/m \quad 10.18$$

7) Nejistota lepidla

Při měření bylo použito lepidlo X60 a proběhly víc jak 3 zatěžovací cykly. Z toho plyne, že standartní nejistota je $1 \mu\text{m}/\text{m}$.

$$u_{\varepsilon 7} = u_7 \cdot A_7 = 1 \cdot 1 = 1 \mu\text{m}/\text{m} \quad 10.19$$

8) Nejistota kabelu propojující tenzometr s ústřednou

Po zvážení všech rušivých elementů, které mohly vstoupit do chyby kabelu. Byla zvolena standartní nejistota $6 \mu\text{m}/\text{m}$. V našem případě je třeba brát v potaz, že se měřilo v elektrárně, kde se obecně vyskytuje řada negativních elektrických vlivů.

$$u_{\varepsilon 8} = u_8 \cdot A_8 = 6 \cdot 1 = 6 \mu\text{m}/\text{m} \quad 10.20$$

9) Nejistota měřicí ústředny

Při měření byla použita měřicí ústředna EMS DV 803. Výrobce udává, že chyba je lepší než $\pm 1\%$ (pro plný rozsah a provozní teplotu). Nejistota měřicí ústředny v sobě zahrnuje chyby všech použitých součástek. viz Obr. 4.7

$$u_{\varepsilon 9} = \frac{z_{\max}}{\chi} \cdot A_9 = \frac{30}{3} \cdot 1 = 10 \mu\text{m}/\text{m} \quad 10.21$$

10) Nejistota kabelu propojující měřicí ústřednu s PC

$$u_{\varepsilon 10} = 0 \mu\text{m}/\text{m} \quad 10.22$$

Nejistota přetvoření - $u_{B\varepsilon}$

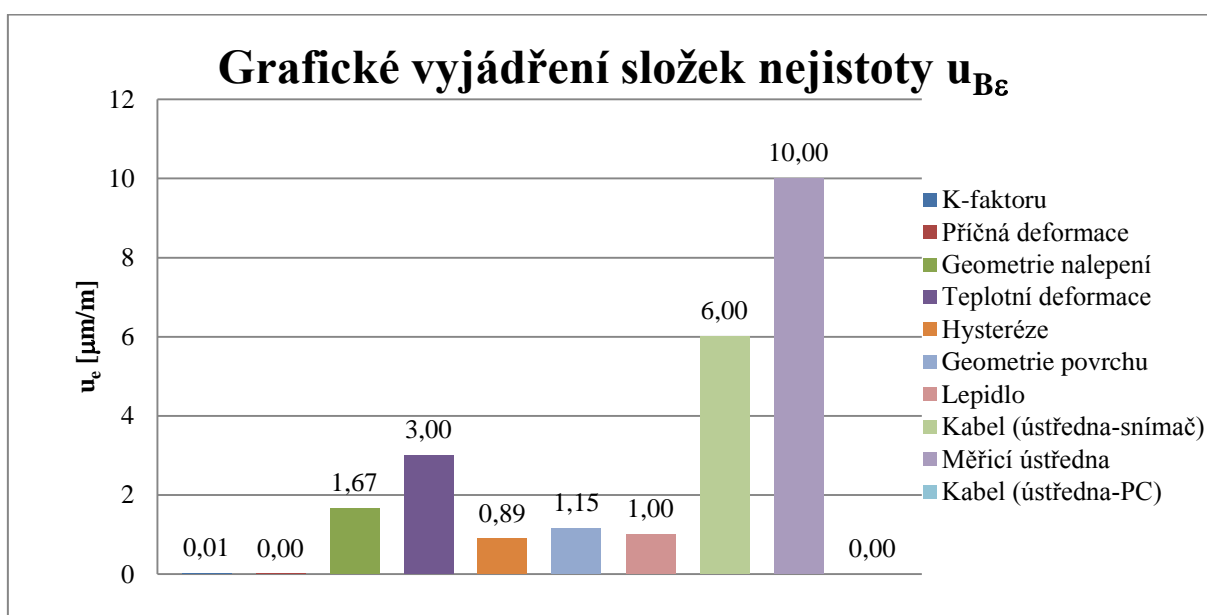
$$u_{B\varepsilon} = \sqrt{u_{\varepsilon 1}^2 + u_{\varepsilon 2}^2 + u_{\varepsilon 3}^2 + u_{\varepsilon 4}^2 + u_{\varepsilon 5}^2 + u_{\varepsilon 6}^2 + u_{\varepsilon 7}^2 + u_{\varepsilon 8}^2 + u_{\varepsilon 9}^2 + u_{\varepsilon 10}^2} \quad 10.23$$

$$u_{B\varepsilon} = \sqrt{0^2 + 0^2 + 1,67^2 + 3^2 + 0,89 + 1,15^2 + 1^2 + 6^2 + 10^2 + 0^2} \quad 10.24$$

$$u_{B\varepsilon} = \pm 12,28 \mu\text{m}/\text{m} \quad 10.25$$

Tab. 10.6: Bilanční tabulka nejistot měření přetvoření

Veličina	Odhad	Standartní nejistota	Typ rozdělení	Citlivostní koeficient	Příspěvek ke standardní nejistotě
X_i	x_i	$u(x_i)$	χ	A_i	$u_i(y)$
	$[\mu\text{m/m}]$	$[\mu\text{m/m}]$	$[-]$	$[-]$	$[\mu\text{m/m}]$
K - faktor	0,02	0,01	Rovnoměrné	1	0,00
Příčná deformace	0,01	0,00	Rovnoměrné	1	0,00
Geometrie nalepení	5	1,67	Normální	1	1,67
Teplotní deformace	9	3	Normální	1	3,00
Hystereze	2,97	0,89		1	0,89
Geometrie povrchu	2	1,15	Rovnoměrné	1	1,15
Lepidlo		1,00		1	1,00
Kabel (ústředna snímač)		6,00		1	6,00
Měřicí ústředna	30	10,00	Normální	1	10,00
Kabel (ústředna PC)	0			1	0,00
Nejistota $u(\epsilon)$ $[\mu\text{m/m}]$					$\pm 12,28$

Graf 10.1: Grafické vyjádření složek nejistot $u_{B\epsilon}$

VÝPOČET NEJISTOTY HLAVNÍCH NAPĚTÍ A REDUKOVANÉHO NAPĚTÍ

Rozbor výpočtu nejistoty měření napětí je detailně proveden pouze pro měřený stav 10 a měřicí bod 6-1. Správně by měl být rozbor proveden pro všechny naměřené hodnoty, ale vzhledem k rozsáhlosti naměřených dat není možné dělat rozbor výpočtu nejistoty měření pro všechny měřené stavy.

Tab. 10.7: Hodnoty pro rozbor výpočtu nejistoty měření

Stav	Měřicí bod	p_I	ε_I	ε_{II}	σ_I	σ_{II}	σ_{red}
10	6-1	[MPa]	[$\mu\text{m/m}$]	[$\mu\text{m/m}$]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
		1,93	588,81	163,33	140,18	74,72	121,49

Nejistota hlavních napětí - $u_{B\sigma}$

- Výpočet složek celkové standartní nejistoty**

a) Nejistota přetvoření - $u_{B\varepsilon}$

$$u_{\varepsilon} = 12,28 \mu\text{m/m}$$

$$u_{B\varepsilon}(\sigma_I, \sigma_{II}) = u_{\varepsilon} \cdot A_{\varepsilon} = u_{\varepsilon} \cdot \frac{E}{1 - \mu} = 12,28 \cdot \frac{200\,000}{1 - 0,3} \cdot 10^{-6} = 3,51 \text{ MPa} \quad 10.26$$

b) Nejistota modulu pružnosti - u_{BE}

Chyba modulu pružnosti se uvažuje 10% a použije se normální rozdělení pravděpodobnosti.

$$u_{BE}(\sigma_I) = \frac{z_{max}}{\chi} \cdot A_E = \frac{z_{max}}{\chi} \cdot \frac{\varepsilon_I}{1 - \mu} = \frac{20000}{3} \cdot \frac{588,81}{1 - 0,3} \cdot 10^{-6} = 5,61 \text{ MPa} \quad 10.27$$

$$u_{BE}(\sigma_{II}) = \frac{z_{max}}{\chi} \cdot A_E = \frac{z_{max}}{\chi} \cdot \frac{\varepsilon_{II}}{1 - \mu} = \frac{20000}{3} \cdot \frac{163,33}{1 - 0,3} \cdot 10^{-6} = 1,56 \text{ MPa} \quad 10.28$$

c) Nejistota Poissonovi konstanty - $u_{B\mu}$

Chyba Poissonovi konstanty se uvažuje 5% a použije se normální rozdělení pravděpodobnosti.

$$u_{B\mu}(\sigma_I) = \frac{z_{max}}{\chi} \cdot A_{\mu} = \frac{z_{max}}{\chi} \cdot \frac{\varepsilon_I \cdot E}{(1 - \mu)^2} = \frac{0,02}{3} \cdot \frac{588,81 \cdot 200000}{(1 - 0,3)^2} \cdot 10^{-6} = 1,20 \text{ MPa} \quad 10.29$$

$$u_{B\mu}(\sigma_{II}) = \frac{z_{max}}{\chi} \cdot A_{\mu} = \frac{z_{max}}{\chi} \cdot \frac{\varepsilon_{II} \cdot E}{(1 - \mu)^2} = \frac{0,02}{3} \cdot \frac{166,33 \cdot 200000}{(1 - 0,3)^2} \cdot 10^{-6} = 0,33 \text{ MPa} \quad 10.30$$

- Výpočet celková standardní nejistoty

$$u_{B\sigma_I} = \sqrt{u_{B\varepsilon}^2 + u_{BE}^2 + u_{B\mu}^2} = \sqrt{3,51^2 + 5,61^2 + 1,20^2} \quad 10.31$$

$$u_{B\sigma_I} = \pm 6,72 \text{ MPa} \quad 10.32$$

$$u_{B\sigma_{II}} = \sqrt{u_{B\varepsilon}^2 + u_{BE}^2 + u_{B\mu}^2} = \sqrt{3,51^2 + 1,56^2 + 0,33^2} \quad 10.33$$

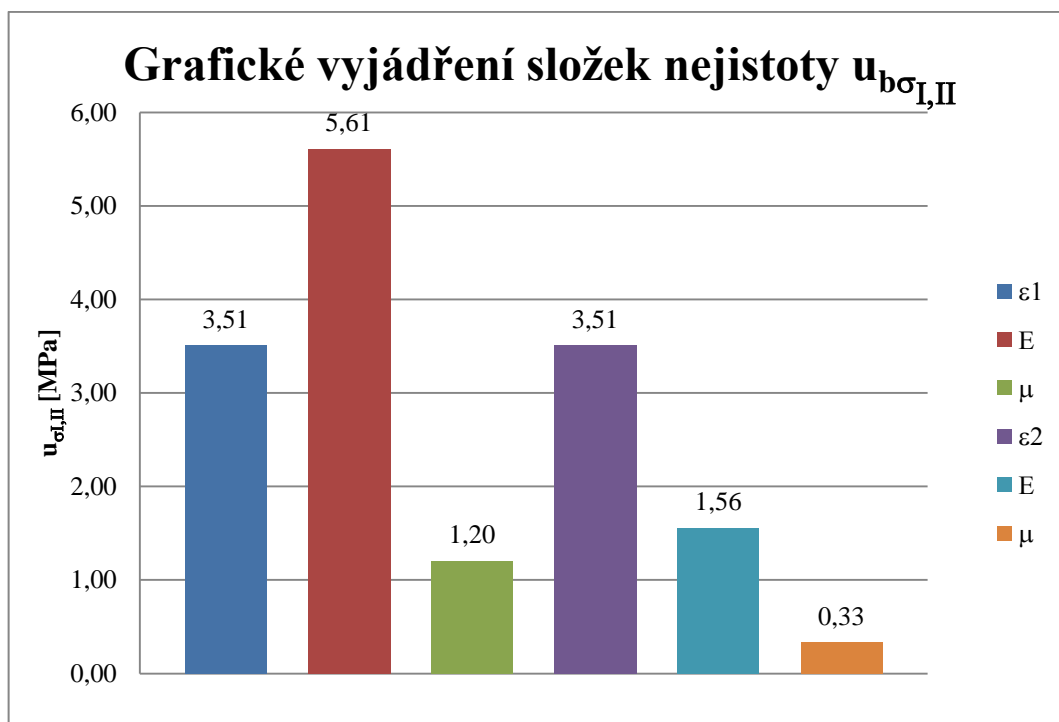
$$u_{B\sigma_{II}} = \pm 3,85 \text{ MPa} \quad 10.34$$

Tab. 10.8: Bilanční tabulka nejistot měření napětí σ_I

Veličina	Odhad	Standardní nejistota	Citlivostní koeficient	Příspěvek ke standardní nejistotě
X_i	x_i	$u(x_i)$	A_i	$u_i(\sigma_I)$
ε	-	12,28 $\mu\text{m/m}$	285714 MPa/ $\mu\text{m/m}$	3,51 MPa
E	10 [%]	6667 MPa	841,16	5,61 MPa
μ	5 [%]	0,01	240330612 MPa	1,20 MPa
Nejistota $u(\sigma_I)$ [MPa]				$\pm 6,72$

Tab. 10.9: Bilanční tabulka nejistot měření napětí σ_{II}

Veličina	Odhad	Standardní nejistota	Citlivostní koeficient	Příspěvek ke standardní nejistotě
X_i	x_i	$u(x_i)$	A_i	$u_i(\sigma_{II})$
ε	-	12,28 $\mu\text{m/m}$	285714 MPa/ $\mu\text{m/m}$	3,51 MPa
E	10 [%]	6667 MPa	233,33	1,56 MPa
μ	5 [%]	0,01	66665306 MPa	0,33 MPa
Nejistota $u(\sigma_{II})$ [MPa]				$\pm 3,85$

Graf 10.2: Grafické vyjádření složek nejistoty $u_{B\sigma_{I,II}}$ **Nejistota redukovaného napětí - $u_{B\sigma_{red}}$**

• Výpočet složek celkové standardní nejistoty

c) Nejistota napětí σ_I - $u_{B\sigma_I}$
 $u_{\sigma_I} = 6,72 \text{ MPa}$

$$u_{\sigma_I}(\sigma_{red}) = u_{\sigma} \cdot A_{\sigma} = u_{\sigma_I} \cdot \frac{2 \cdot \sigma_I \cdot \sigma_{II}}{2 \cdot \sqrt{\sigma_I^2 + \sigma_{II}^2} - \sigma_I \cdot \sigma_{II}} \quad 10.35$$

$$u_{\sigma_I}(\sigma_{red}) = 6,72 \cdot \frac{2 \cdot 140,18 \cdot 74,72}{2 \cdot \sqrt{140,18^2 + 74,72^2} - 140,18 \cdot 74,72} = 5,69 \text{ MPa} \quad 10.36$$

d) Nejistota napětí σ_{II} - $u_{B\sigma_{II}}$
 $u_{\sigma_{II}} = 3,85 \text{ MPa}$

$$u_{\sigma_{II}}(\sigma_{red}) = u_{\sigma} \cdot A_{\sigma} = u_{\sigma_{II}} \cdot \frac{2 \cdot \sigma_I \cdot \sigma_{II}}{2 \cdot \sqrt{\sigma_I^2 + \sigma_{II}^2} - \sigma_I \cdot \sigma_{II}} \quad 10.37$$

$$u_{\sigma_{II}}(\sigma_{red}) = 3,85 \cdot \frac{2 \cdot 140,18 \cdot 74,72}{2 \cdot \sqrt{140,18^2 + 74,72^2} - 140,18 \cdot 74,72} = 0,15 \text{ MPa} \quad 10.38$$

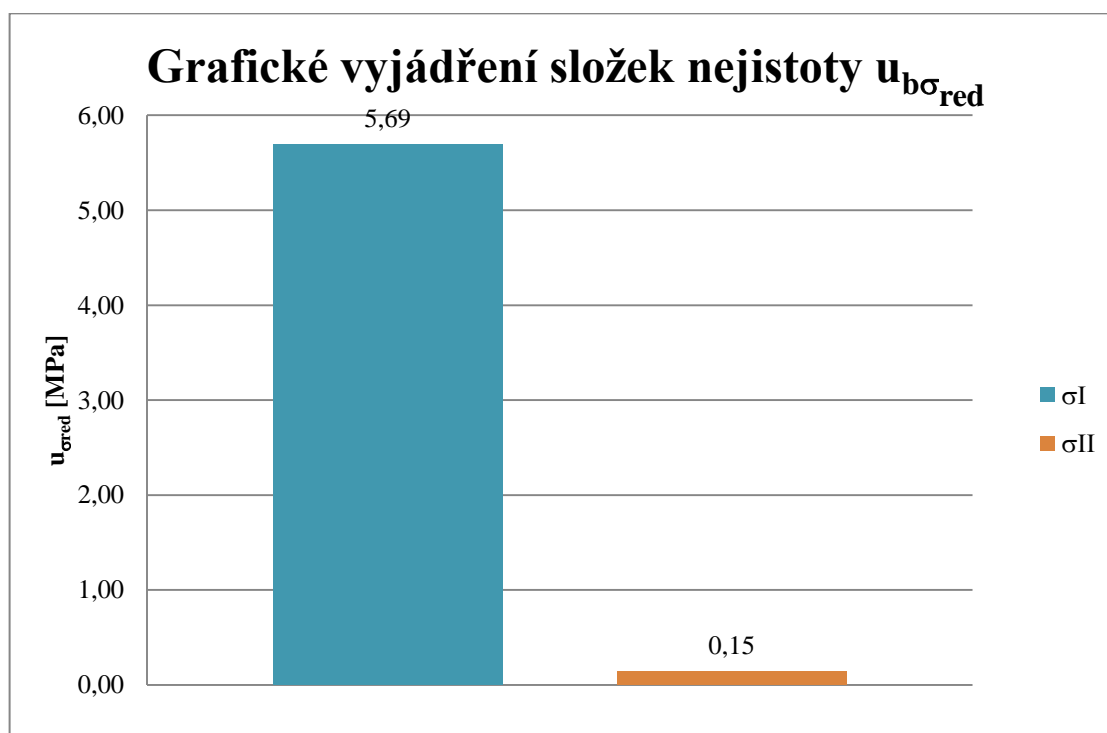
- Výpočet celková standartní nejistoty

$$u_{B\sigma_{red}} = \sqrt{u_{B\sigma_I}^2 + u_{B\sigma_{II}}^2} = \sqrt{5,69^2 + 0,15^2} \quad 10.39$$

$$u_{B\sigma_{red}} = \pm 5,69 \text{ MPa} \quad 10.40$$

Tab. 10.10: Bilanční tabulka nejistot měření redukovaného napětí σ_{red}

Veličina	Odhad	Standartní nejistota	Citlivostní koeficient	Příspěvek ke standartní nejistotě
X_i	x_i	$u(x_i)$	A_i	$u_i(\sigma_{red})$
σ_I	-	6,72 MPa	0,85	5,69 MPa
σ_{II}	-	3,85 MPa	0,04	0,15 MPa
Nejistota $u(\sigma_{red})$ [MPa]				$\pm 5,69$



Graf 10.3: Grafické vyjádření složek nejistoty $u_{B\sigma_{red}}$

VÝPOČET STANDARTNÍ ROZŠÍŘENÁ NEJISTOTY MĚŘENÍ

Standartní rozšířená nejistota přetvoření

$$U_{\varepsilon} = k \cdot u_{B\varepsilon} = 2 \cdot \pm 12,28 = \pm 24,57 \mu\text{m/m} \quad 10.41$$

Standartní rozšířená nejistota napětí

$$U_{\sigma_I} = k \cdot u_{B\sigma_I} = 2 \cdot \pm 6,72 = \pm 13,45 \text{ MPa} \quad 10.42$$

$$U_{\sigma_{II}} = k \cdot u_{B\sigma_{II}} = 2 \cdot \pm 3,85 = \pm 7,71 \text{ MPa} \quad 10.43$$

$$U_{\sigma_{red}} = k \cdot u_{B\sigma_{red}} = 2 \cdot \pm 5,69 = \pm 11,38 \text{ MPa} \quad 10.44$$

Uvedená rozšířená nejistota měření je součinem standartní nejistoty měření a koeficientu rozšíření $k=2$, což pro normální rozdělení odpovídá pravděpodobnosti pokrytí cca 95%. Standartní nejistota měření byla určena v souladu s dokumentem EA 4/02.

10.6.2 NEJISTOTA OSTATNÍCH VELIČIN

Nejistoty ostatních veličin, zejména pak snímače tlaku, se nepočítaly. Pro výpočet nejistoty měření P a H nejsou dostatečné informace o snímačích a z hlediska použití výsledků měření z těchto veličin nemá význam nejistotu počítat. Nejistota tlaku je stejně důležitá jako nejistota tenzometrů, avšak pro výpočet není v této práci prostor a výpočet není proveden.

10.7 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ

- Velikost napětí na spirále, není závislé na výkonu soustrojí, otevření RK a dalších veličinách, ale je dáno pouze tlakem vody, který se vyskytuje uvnitř spirály. Viz graf C.2 a C.13.
- Největší napětí na spirále se vyskytuje při simulaci poruchového odstavení turbíny.
- Největší naměřené napětí se vyskytovalo v měřicích bodech 1-1 (segment č. 1) a 6-1 (segment č.6). Absolutní hodnota největšího měřeného napětí je $\sigma_{red}=121,49 \text{ MPa}$ respektive 120,98. Viz graf C.6 a C.7.
- Naměřená data se ve stejných rovinách, ale na jiných segmentech, téměř shodují. Viz graf C.13.
- Všechny naměřené hodnoty napětí jsou v tlaku.
- Na naměřených hodnotách tlaku p_2 je vidět, že hodnota je téměř konstantní pro stejné provozní stavy. Viz graf C.7 a C.8
- Na naměřených datech je patrné, že hodnota tlaku uvnitř spirály a s tím související naměřené napětí, je pro různé výkony soustrojí mírně odlišná. Viz graf C.2, C6, C7 a C8.
- Během celého měření zůstala hodnota H konstantní. Viz graf C.3
- Celková standartní rozšířená nejistota přetvoření (U_{ε}) a napětí (U_{σ_I} , $U_{\sigma_{II}}$, $U_{\sigma_{red}}$), která byla stanovena na základě všech dostupných informací, vyhovuje pro daný typ měření.
- Minimální koeficient bezpečnosti, který byl vypočítán z nejvyššího naměřeného redukovaného napětí, které bylo naměřeno na místě spirály, kde se předpokládá největší možné napětí, neklesl pod hodnotu $k_k=2,9$.

ZÁVĚR

Předkládaná diplomová práce je tvořena ze dvou základních částí. V první teoretické části, která je zpracována rešeršně, jsou uvedeny kapitoly zabývající se základy mechaniky, tenzometrie, měřením tlaku, nejistotou měření, měřením a vyhodnocením. Dále jsou v kapitole 2 popsány základní termíny a definice, které přímo souvisí se zpracovaným tématem a kapitola, která popisuje vodní dílo Lipno nad Vltavou a s tím související problematikou VE Lipno I. Jednotlivé kapitoly, které jsou zařazeny v první části byly voleny tak, aby postihly teorii, která je se vztahuje k zadání práce. Ve druhé praktické části jsou zpracována dvě měření napjatosti na spirále FT VE Lipno I soustrojí TG2 mezi roky 2012 a 2014. Současně s napjatostí byl měřen tlak uvnitř spirály.

Dosažené cíle práce

Mezi hlavní cíle, které byly v plném rozsahu splněny, patří stanovení napjatosti ve spirále, rozbor nejistoty měření napjatosti a porovnání měření tlaku ve vodě s napjatostí ve spirále. Vytyčené cíle, které jsou uvedeny v kapitole 1.2:

- **Tenzometrickým měřením stanovit napjatost na spirále VE Lipno I před a po GO**
V kapitole 9 je uvedeno měření na spirále TG2 před GO. Výsledky z tohoto měření byly zapracovány do pevnostního výpočtu, který je uveden ve zprávě [25]. Na základě statického výpočtu spirály TG1, který je proveden ve zprávě [25] lze konstatovat, že měření má reálné hodnoty. Zjištěné odchylky mezi výpočtem a měřením se pohybují v rámci nejistoty měření a možné odchylky statického výpočtu od reálného chování soustrojí.
V kapitole 10 je uvedeno měření na spirále TG2 po GO. Na základě naměřených dat lze konstatovat, že mechanické napětí se v nejnamáhavějších místech spirály a při nejnáročnějších provozních stavech pohybuje v oblasti pružných deformací.
- **Výpočet nejistoty měření přetvoření a napětí na spirále**
Součástí kapitol 9 a 10 je výpočet nejistot přetvoření a napětí. Teorie k těmto výpočtům je rozebrána v kapitolách 7 a 8. V každé kapitole má výpočet nejistoty přetvoření a napětí mírně odlišné hodnoty dílčích nejistot přetvoření a jinou velikosti chyby Poissonovi konstanty δ_μ . Chyba modulu pružnosti δ_E je stejná.
- **Porovnání tlaku ve vodě s napjatostí ve spirále**
Součástí měření napjatosti před a po GO bylo i měření tlaku uvnitř spirály. V kapitolách 9.5 a 10.5 je provedeno zmíněné porovnání. Z naměřených dat, zejména při měření po GO, lze konstatovat, že porovnání těchto dvou měřených veličin je po technické stránce relevantní. Dynamické chování napětí na spirále se plně shoduje s dynamickým chováním tlaku vody uvnitř spirály. Pro vytvoření matematického modelu a následné aplikace tohoto jevu do dalších měření, by bylo nutné provést větší množství experimentální verifikace. Tento jev by se dal následně využít například pro měření tlakových rázů v potrubních systémech.

- **Zhodnocení dat z hlediska mechaniky**
V kapitole 9.4.1 a 10.4.1 je proveden výpočet bezpečnosti pro nejvyšší naměřené hodnoty napětí. Posouzení z hlediska mezních stavů, spolehlivosti, životnosti je mimo rozsah této práce.
- **Porovnání naměřených dat na spirále před a po GO**
Vzhledem k tomu, že měření na spirále po GO probíhalo cca 1 týden před odevzdáním této práce. Zpráva neobsahuje detailní porovnání napjatosti na spirále před a po GO. Avšak na základě jednoduchého předběžného zhodnocení lze konstatovat, že naměřená data po GO se shodují v rámci možností porovnání vícero měření, které probíhaly za odlišných okrajových podmínek (jiné ukotvení spirály, podobná místa, kde byly nalepeny tenzometry, odlišný tlak vody ve spirále apod.) s daty, které byly naměřeny při tlakové zkoušce viz [28]. Dále se pak v rámci porovnatelnosti a nejistoty měření shodují i s pevnostním výpočtem, který je uveden ve zprávě [27]. Absolutní porovnání napjatosti na spirále před a po GO není možné a to zejména z těchto důvodů: odlišný materiál, jiná konstrukce a stáří spirály. Na základě naměřených dat lze pouze konstatovat, jestli chod spirály je možný, anebo není možný.

Přínos práce

Přínos této práce spočívá ve vytvoření funkčního matematicky-technického modelu výpočtu nejistoty typu B pro tenzometrické měření. Vzhledem k tomu, že v praxi jsou nejrozšířenější a nejvíce používané tenzometry firmy HBM jednoosé a dvojosé, je přínos pro praxi zřejmý. Na základě vzorců a postupů výpočtu uvedených v kapitole 7 a 8 a reálných výpočtů, které jsou uvedeny v kapitole 9.6 a 10.6, lze jednoduše aplikovat uvedené výpočty nejistoty typu B pro tenzometrické měření na další měření, která jsou prováděna za standartních zkušebních podmínek. V další práci by bylo vhodné provést zdokonalení výpočtu nejistot, například rozšířením možných dílčích zdrojů přetvoření typu B, zdokonalením matematického modelu výpočtu a dále pak doplněním výpočtu pro speciální typy tenzometrů jako jsou vysokoteplotní, polovodičové apod.

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] JANÍČEK, Přemysl, Emanuel ONDRÁČEK, Jan VRBKA a Jiří BURŠA. *Mechanika těles: Pružnost a pevnost I.* třetí přepracované vydání. Brno, 2004. ISBN 80-214-2592-x.
- [2] VRBKA, Jan. *Pružnost a pevnost I: Učební text.* Brno, 2012. Dostupné z: <http://www.umt.fme.vutbr.cz/cz/studium/studijni-materialy.html>
- [3] ONDRÁČEK, Emanuel, Jan VRBKA, Přemysl JANÍČEK a Jiří BURŠA. *Mechanika těles: pružnost a pevnost II.* 4. přeprac. vyd. Brno: CERM, 2006, 262 s. ISBN 80-214-3260-8.
- [4] VLK, Miloš et al. *Experimentální mechanika.* Brno, 2003. Dostupné z: <http://www.umt.fme.vutbr.cz/cz/studium/studijni-materialy.html>
- [5] ČECH, Jaroslav; PERNÍKÁŘ, Jiří; PODANÝ, Kamil. *Strojírenská metrologie I.* páté. Brno : AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM, 2009. 183 s. ISBN 978-80-214-4010-4
- [6] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu I.* 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2003, 516 s. ISBN 80-720-4283-1.
- [7] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II.* 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002, 392 s. ISBN 80-7204-248-32
- [8] CHUDÝ, Vladimír. *Meranie technických veličín.* 1. vyd. Bratislava: STU, 1999, 689 s. ISBN 80-227-1275-2.
- [9] ŠOB, František. *Hydromechanika.* druhé. Brno: AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM, 2008, 238 s. ISBN 978-80-214-3578-0.
- [10] JANÍČEK, Přemysl. *Technický experiment – vybrané kapitoly.* Brno, 2004. Dostupné z: <http://www.umt.fme.vutbr.cz/cz/studium/studijni-materialy.html>
- [11] ŠOB, František. *Projektování vodních elektráren – Hydraulické výpočty (podklady poskytnuté při výuce kurzu),* Blansko, 2011
- [12] ČSN 08 5000. *Názvosloví vodních turbín, akumulčních čerpadel, čerpadlových turbín a regulátorů vodních turbín.* Praha: Český normalizační institut.
- [13] ČSN EN 60193. *Vodní turbíny, akumulční čerpadla a čerpadlové turbíny: Přejímací zkoušky na modelu.* Praha: Český normalizační institut, 2002.
- [14] KRAUS, Zdeněk. *Tensometrování zkušební spirály Lipno.* Zpráva ČKD Blansko č. 4-VYU-2412, 1956
- [15] RAMPÁČEK, František. *Tensometrování spirály pro TG 2 hc. Lipno.* Závěrečná zpráva ČKD Blansko č. 4-VYU-3315, 1958
- [16] RAMPÁČEK, František, Antonín Till. *Tensometrování spirály pro TG I hc. Lipno.* Závěrečná zpráva ČKD Blansko č. 4-VYU-3400, 1959

- [17] RAMPÁČEK, František. Tensometrování spirály pro TG 1 hc. Lipno při uvádění do provozu. Zpráva ČKD Blansko č. 4-VYU-3670, 1959
- [18] RAMPÁČEK, František. Kontrola napjatosti u spirály TG 1 a TG 2 VE Lipno 1. Závěrečná zpráva ČKD Blansko č. 4-VYU-4721, 1963
- [19] BOHDAN, Zdeněk, Jiří Havlík, Jiří Šefrānek, Jan Chvojan. Namáhání spirální skříně TG2 Lipno. Zpráva ZVIL Plzeň SV 3075 LZP-VZÚ-VS, 1959
- [20] BĀRTÍK, Jan a kol. Namáhání spirální skříně turbíny generátoru 2 Lipno. Technická zpráva ŠKODA k.p. Plzeň-ETD, VÚET 7709, 1989
- [21] ŠARBORT, Pavel, Petr JAROŠ. Pevnostní posouzení spirálních skříní turbín TG1 a TG2 hydrocentrály Lipno na základě tenzometrického měření. Výzkumná zpráva SVÚSS č.90-02004, 1990
- [22] DOKOUPIL, Pavel. Tenzometrické měření spirální skříně TG2 hydrocentrály VE Lipno I. Závěrečná zpráva ÚAM Brno, s.r.o., ZP5274, 2013
- [23] DOKOUPIL, Pavel. Tenzometrické měření spirální skříně TG2 hydrocentrály VE Lipno I po GO. Závěrečná zpráva ÚAM Brno, s.r.o., ZP5446, 2014
- [24] JURÁŠEK, Ladislav. Posouzení přípustnosti defektů ve svarových spojích spirálních skříní turbín na vodní elektrárně Lipno. Zpráva ÚAM Brno, s.r.o., ZP4660, 2010
- [25] JURÁŠEK, Ladislav, Libor Vlček, Jiří Valášek. Posouzení spirály TG1 vodní elektrárny Lipno. Zpráva ÚAM Brno, s.r.o., ZP5435, 2014
- [26] KLAPAL, Tomáš, Jiří Novotný. Měření před GO – Výsledky měření parametrů regulace a provozních parametrů: VE Lipno I – TG 2. Zpráva ČKD Blansko Engineering, a.s., MES-2013-0003
- [27] FEILHAUER, Michal, Miroslav Varner. GO TG2 ELI-Strojní část VE Lipno I – Pevnostní kontrola spirály a předrozvaděče. Zpráva ČKD Blansko Engineering, a.s., 4-ENR-2-4679c, 2012
- [28] LOUB, Radim, Jiří Novotný. VE LIPNO I – TG2 - Zpráva z tlakové zkoušky a tenzometrických měření spirály. Zpráva ČKD Blansko Engineering, a.s. MES-2013-0013a
- [29] Pevnostní výpočet svařované spirály o vstupním \varnothing 2500, spád 162 m, dle výkr. O-VTU-8004-03, Zpráva ČKD Blansko č. 4-VTU-9901-08
- [30] ČEZ, PZ - Změna konfigurace zařízení, č. 0360, ELI GO TG2, str. 12-14 spirála
- [31] FLORYAN, Josef. ZL-ÚAM SOP-02: Tenzometrické měření zatížení konstrukcí. Brno, 2013. Část příručky kvality ŽKL č. 1228. Interní dokument ÚAM Brno.
- [32] FLORYAN, Josef. ZL-ÚAM Příručka kvality zkušeni laboratoře ÚAM Brno, s.r.o. Brno, 2013. Interní dokument ÚAM Brno.

- [33] FLORYAN, Josef. ZL-ÚAM_QI5.4/02: Postup při odhadu nejistoty měření ve zkušební laboratoři. Brno, 2013. Interní dokument ÚAM Brno.
- [34] DOKOUPIL, Pavel. *Modelový výzkum vodních turbín*. Brno, 2011. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. Vedoucí práce doc. Ing. Jaroslav Štigler, Ph.D.
- [35] VOHLÍDAL, Miroslav. Stanovení teoretické hodnoty nejistoty měření plného Wheatstoneova můstku. Pardubice, 2010. Diplomová práce. Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, Katedra dopravního stavitelství. Vedoucí práce doc. Ing. Bohumil Culek, Ph.D.
- [36] ŠVAŘÍČEK, Milan. *Využití numerických simulací a neuronových sítí ke zdokonalení odvrtávací metody zjišťování zbytkové napjatosti*. Brno, 2007. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky. Školitel doc. Ing. Miloš Vlk, CSc.
- [37] Elektronický zpravodaj ČKD Blansko Engineering, a.s., č.02/2012, str.1, Kotouček, Skotáková, VE Lipno, ČR – generální oprava a modernizace soustrojí TG2. Dostupné z: <http://www.cbeng.cz/ke-stazeni/2-2012-231.html>
- [38] Elektronický zpravodaj ČKD Blansko Engineering, a.s., č.02/2013, str.3, Petříček, VE LIPNO, ČR Generální oprava a rekonstrukce soustrojí TG2. Dostupné z: <http://www.cbeng.cz/ke-stazeni/2-2013-271.html>
- [39] Elektronický zpravodaj ČKD Blansko Engineering, a.s., č.03/2013, str.5, Kotouček, Petříček, VE LIPNO, ČR Generální oprava soustrojí TG2. Dostupné z: <http://www.cbeng.cz/ke-stazeni/3-2013-286.html>
- [40] ELEKTRO časopis pro elektrotechniku, č.1/2010, str. 36-39, Kohutka, 50 let vodního díla Lipno. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=40285
- [41] HBM Messtechnik: Aufnehmer, Messverstärker, Software. [online]. [cit. 2013-11-28]. Dostupné z: www.hbm.com
- [42] HBM: měřicí technika. [online]. [cit. 2013-11-28]. Dostupné z: <http://www.hbm.cz/>
- [43] VTSZ Zlín. [online]. [cit. 2014-01-04]. Dostupné z: <http://www.vtsz.cz/>
- [44] Skupina ČEZ. [online]. [cit. 2013-10-02]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/>
- [45] JSP.cz: Měření a regulace. [online]. [cit. 2014-01-06]. Dostupné z: <http://www.jsp.cz/cz/>
- [46] BD SENSORS: snímače tlaku - sondy výšky hladiny - spínače a zobrazovače. [online]. [cit. 2014-01-05]. Dostupné z: <http://www.bdsensors.cz/>
- [47] Beamex: world-class calibration solutions. [online]. [cit. 2014-01-06]. Dostupné z: <http://www.beamex.com/en#>

- [48] Stavba přehrady Lipno: Fotoarchiv - Česká geologická služba. [online]. [cit. 2013-10-12]. Dostupné z: <http://www.geology.cz/aplikace/fotoarchiv/galerie.php?galerie=14>
- [49] Historie vodní elektrárny Lipno. [online]. [cit. 2013-10-13]. Dostupné z: http://www.ckrumlov.info/docs/cz/region_histor_elelip.xml
- [50] Vlastnosti materiálů: pružnost, pevnost. [online]. [cit. 2013-12-10]. Dostupné z: http://www.strojirenstvi.wz.cz/stt/rocnik1/06a_pruznost_pevnost.php
- [51] TEORIE: NAPJATOST. [online]. [cit. 2013-12-02]. Dostupné z: http://mechanika2.fs.cvut.cz/sources_old/pp1/teor32.htm
- [52] E-Automatizace: měření tlaku. [online]. [cit. 2014-01-03]. Dostupné z: http://www.e-automatizace.cz/ebooks/mmv/tlak/ramce_tlak.htm
- [53] JSP: Měření tlaku. [online]. [cit. 2014-01-03]. Dostupné z: http://www.jsp.cz/files/uvod_D.pdf
- [54] Edumat: Snímače tlaku. [online]. [cit. 2014-01-03]. Dostupné z: <http://www.edumat.cz/texty/tlak.pdf>
- [55] AUTOMA č.2000/04: Snímače tlaku. [online]. [cit. 2014-01-04]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=27665
- [56] AUTOMA č.2007/02: Snímače tlaku - principy, vlastnosti a použití (část 1). [online]. [cit. 2014-01-04]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/download/au020728.pdf>
- [57] AUTOMA č.2007/07: Snímače tlaku - principy, vlastnosti a použití (část 2). [online]. [cit. 2014-01-04]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/download/au070725.pdf>
- [58] AUTOMA č.2007/10: Snímače tlaku - principy, vlastnosti a použití (část 3). [online]. [cit. 2014-01-04]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/download/automa/2007/au100723.pdf>
- [59] AUTOMA č.2007/11: Snímače tlaku - principy, vlastnosti a použití (část 4). [online]. [cit. 2014-01-04]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/36290.pdf>
- [60] AUTOMA č.2001/7-8: Nejistoty v měření I: vyjadřování nejistot. [online]. [cit. 2014-01-23]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/download/au070150.pdf>
- [61] AUTOMA č.2001/10: Nejistoty v měření II: nejistoty přímých měření. [online]. [cit. 2014-01-23]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/download/au100152.pdf>
- [62] AUTOMA č.2001/12: Nejistoty v měření III: nejistoty nepřímých měření. [online]. [cit. 2014-01-23]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/download/au120128.pdf>
- [63] BMC Messsysteme GmbH – Innovative Messtechnik “made in Germany“. [online]. [cit. 2014-03-02]. Dostupné z: www.bmc.de
- [64] POHL, Miroslav. EMS DV 803 rev9: Provozní dokumentace k měřicímu systému. Brno, 2011.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

$S_{\bar{x}}$	[-]	Odhad směrodatné odchylka aritmetického průměru
\bar{x}	[-]	Odhad hodnoty měřené veličiny
+u	[-]	Horní mez měřené veličiny
\emptyset	[m]	Průměr
μ	[-]	Poissonovo číslo (součinitel příčné deformace)
3G	[-]	Mobilní komunikace tzv. 3. generace
a	[-]	Univerzální označení fyzikální jednotky veličiny
A	[-]	Citlivostní koeficient
A/D	[-]	Analog/Digitál
A_{μ}	[MPa]	Citlivostní koeficient pro Poissonovo číslo
a_0	[mm] [°]	Otevření rozváděcího kola (úhel natočení rozváděcích lopatek)
A_E	[-]	Citlivostní koeficient pro modul pružnosti
AKL	[-]	Akreditovaná kalibrační laboratoř
Al	[-]	Hliník
AMS	[-]	Autorizované metrologické středisko
ANSYS	[-]	Výpočtový program
A_z	[-]	Převodový (citlivostní) koeficient
A_{ε}	[MPa, $\mu\text{m}/\text{m}$]	Citlivostní koeficient pro přetvoření
A_{σ}	[-]	Citlivostní koeficient pro přetvoření
$A_{\sigma I}$	[-]	Citlivostní koeficient pro hlavní napětí I
$A_{\sigma II}$	[-]	Citlivostní koeficient pro hlavní napětí II
CF	[-]	Compact Flash (druh paměťové karty)
cos	[-]	Goniometrická funkce kosinus
CrN	[-]	Chrom-nikl
Cu-Ni	[-]	Slitina měď-nikl
č	[-]	Číslo
ČBE	[-]	ČKD Blansko Engineering
ČEZ	[-]	České energetické závody
ČKD	[-]	Českomoravská Kolben Daněk
ČMI	[-]	Český metrologický institut
ČR	[-]	Česká republika
ČSN	[-]	Česká technická norma

D	[m]	Průměr potrubí
D	[mm]	Průměr oběžného kola
DC	[-]	Direct current (stejnoseměrný proud)
E	[MPa]	Modul pružnosti v tahu
EA	[-]	European Accreditation (evropská akreditace)
EDGE	[-]	Enhanced Data Rates for GSM Evolution (vylepšený systém GPRS)
E _H	[%]	Hystereze
F	[N]	Síla
F	[-]	Funkce
f	[-]	Funkce
f	[s ⁻¹ , Hz]	Frekvence
FFT	[-]	Fast Fourier transform (rychlá Fourierova transformace)
FT	[-]	Francisova turbína
Ge	[-]	Germánium
GO	[-]	Generální oprava
GPRS	[-]	General Packet Radio System (Obecný paketový rádiový systém)
GSM	[-]	Global System for Mobile communications (globální systém pro mobilní komunikaci)
H	[m]	Spád
HBM	[-]	Hottinger Baldwin Messtechnik
Hg	[m]	Geodetický spád
HMH	[-]	Huber, von Mises, Hencky
HW	[-]	Hardware
i	[-]	i-tá složka, i-tý člen
IP	[-]	Ingress protection (Stupeň ochrany používaný u elektrických přístrojů)
IP	[-]	Internet protokol (IP adresa)
j	[-]	j-tá složka, j-tý člen
k	[-]	Koeficient rozšíření
k, k _z	[-]	Deformační součinitel citlivosti (k-faktor)
k _k	[-]	Koeficient bezpečnosti
KL	[-]	Kalibrační list
k _p	[-]	Konstanta pružnosti materiálu
KU	[-]	Kulový uzávěr

l_0	[mm]	Původní délka
lfx	[-]	Přípona souboru programu NextView
Li-Ion	[-]	Lithium-Iont (druh akumulátoru)
m	[-]	m-tá složka, m-tý člen
max	[-]	Maximální
min	[-]	Minimální
MS	[-]	Mezní stav
MS	[-]	Microsoft
n	[-]	n-tá složka, n-tý člen
N	[-]	Počet cyklů
N	[W/mm ²]	Tepelné zatížení mřížky
N	[-]	Jmenovatel vztahu pro výpočet ψ
n	[-]	Počet měření
N	[-]	Počet měření
n	[min ⁻¹]	Provozní otáčky
NTB	[-]	Notebook (přenosný počítač)
NV	[-]	NextView
n_{zv}	[min ⁻¹]	Průběžné ustálené otáčky
Obr	[-]	Obrázek
P	[MW]	Výkon
p	[Pa]	Tlak
p ₁	[MPa]	Tlak vody ve spirále při měření před GO
p ₂	[MPa]	Tlak vody ve spirále při měření po GO
PC		Personál Computer (počítač)
p_i	[mV]	Indikovaný tlak
Pl.	[-]	Plném
p_s	[MPa]	Skutečný tlak
PVC	[-]	Polyvinylchlorid
Q	[m ³ /s]	Průtok
R	[Ω]	Elektrický (ohmický) odpor
r	[-]	Nelineární člen
R_e	[MPa]	Mez kluzu
RK	[-]	Regulační kruh, Rozváděcí kolo

R_m	[MPa]	Mez pevnosti
RS	[-]	Recommeded Standart (doporučený komunikační standart)
RTG	[-]	Rentgenové záření
S	[m ²]	Plocha mřížky tenzometru
S	[m ²]	Plocha
S.N.	[-]	Seriál Number (sériové číslo)
Sb.	[-]	Sbírka
Si	[-]	Křemík
sin	[-]	Goniometrická funkce sinus
SOP	[-]	Standartní operační postup
SRN	[-]	Spolková republika Německo
SVÚSS	[-]	Státní výzkumný ústav pro stavbu strojů Běchovice
SW	[-]	Software
S_x	[-]	Směrodatná odchylka aritmetického průměru
T	[-]	Tenzor
t	[mm]	Tloušťka plechu
Tab	[-]	Tabulka
TG	[-]	Turbína generátor
txt	[-]	Přípona textového souboru
T_ε	[-]	Tenzor přetvoření
T_σ	[-]	Tenzor napětí
U	[-]	Rozšířená nejistota měření
-u	[-]	Dolní mez měřené veličiny
u(x)	[μm/m, MPa]	Standartní nejistota
u(y)	[μm/m, MPa]	Příspěvek ke standartní nejistotě
u_μ	[μm/m]	Nejistota Poissonova čísla
u_A	[-]	Standartní nejistota určena metodou A
ÚAM	[-]	Ústav aplikované mechaniky
U_b	[V]	Napájecí napětí
u_B	[-]	Standartní nejistota určena metodou B
$u_{B\mu}$	[μm/m]	Nejistota Poissonovi konstanty
u_{BE}	[μm/m]	Nejistota modulu pružnosti
$u_{B\varepsilon}$	[μm/m]	Celková standartní nejistota přetvoření

$u_{B\sigma 1-2}$	[$\mu\text{m/m}$]	Celková standartní nejistota hlavních napětí
$u_{B\sigma red}$	[MPa]	Celková standartní nejistota redukovaného napětí
u_c	[-]	Kombinovaná standartní nejistota
u_E	[$\mu\text{m/m}$]	Nejistota modulu pružnosti
U_N	[V]	Napájecí napětí
USA	[-]	United States of America (Spojené státy americké)
U_V	[V]	Výstupní napětí
u_x	[-]	Složka nejistoty
u_z	[-]	Odhad standartní nejistoty
u_ε	[$\mu\text{m/m}$]	Nejistota přetvoření
U_ε	[$\mu\text{m/m}$]	Standartní rozšířená nejistota přetvoření
$u_{\varepsilon 1-10}$	[$\mu\text{m/m}$]	Příspěvek ke standartní nejistotě
u_σ	[MPa]	Nejistota hlavního napětí
$U_{\sigma I}$	[MPa]	Standartní rozšířená nejistota napětí I
$U_{\sigma II}$	[MPa]	Standartní rozšířená nejistota napětí II
$u_{\sigma I-II}$	[MPa]	Nejistota hlavního napětí I, II
$U_{\sigma red}$	[MPa]	Standartní rozšířená nejistota redukovaného napětí
VD	[-]	Vodní dílo
VE	[-]	Vodní elektrárna
VŠCHT	[-]	Vysoká škola chemicko-technologická
VT	[-]	Vodní turbína
w	[mm]	Prodloužení materiálu
WiFi	[-]	Wireless Fidelity (komunikační standart pro bezdrátový přenos dat)
win	[-]	Windows
X	[-]	Měřená hodnota veličiny
X	[-]	Veličina
x	[$\mu\text{m/m}$, MPa]	Odhad
x_i	[$\mu\text{m/m}$, Mpa]	Vypočtená hodnota přetvoření (napětí)
Y_z	[m]	Místní ztráty
z	[-]	Univerzální označení fyzikální jednotky veličiny
Z	[-]	Čítatel vztahu pro výpočet ψ
Z	[-]	Zdroj nejistoty
ZKL	[-]	Zkušební kalibrační laboratoř

ZL	[-]	Zkušební laboratoř
z_{\max}	[-]	Maximální odchylka
z_{ob}	[-]	Počet oběžných lopatek
z_{rozv}	[-]	Počet rozváděcích lopatek
ZVIL	[-]	Závody Vladimíra Iljiče Lenina (Škoda Plzeň)
α	[Bq]	Druh záření
α	[°]	Úhel mezi tenzometrem a růžicí a maximálním napětím
α_R	[1/°K]	Teplotní součinitel elektrického odporu materiálu mřížky
α_S	[1/°K]	Teplotní součinitel délkové roztažnosti materiálu
α_V	[1/°K]	Teplotní součinitel materiálu vinutí mřížky
β	[Bq]	Druh záření
γ	[°]	Úhlové přetvoření
γ	[Bq]	Druh záření
Δ	[-]	Změna
δ_μ	[%]	Chyba Poissonovi konstanty
δ_E	[%]	Chyba modulu pružnosti
δ_H	[$\mu\text{m}/\text{m}$]	Chyba hystereze tenzometru
Δl	[mm]	Rozdíl původního a nové délky
ΔR	[Ω]	Změna elektrického (ohmického) odporu
Δt	[s]	Rozdíl času
δ_z	[-]	Hodnota dílku stupnice
δ_{zi}	[-]	Rozlišitelnost daného přístroje
ε	[μm]	Délkové přetvoření
ε	[$\mu\text{m}/\text{m}$]	Poměrné prodloužení, poměrná deformace, relativní přetvoření
ε	[$\mu\text{m}/\text{m}$]	Relativní přetvoření
ε_1	[μm]	Maximální hlavní přetvoření
ε_2	[μm]	Střední hlavní přetvoření
ε_3	[μm]	Minimální hlavní přetvoření
ε_a	[$\mu\text{m}/\text{m}$]	Měřené přetvoření na tenzometrické růžici ve směru a
ε_b	[$\mu\text{m}/\text{m}$]	Měřené přetvoření na tenzometrické růžici ve směru b
ε_c	[$\mu\text{m}/\text{m}$]	Měřené přetvoření na tenzometrické růžici ve směru c
ε_I	[$\mu\text{m}/\text{m}$]	Hlavní přetvoření I
ε_i	[$\mu\text{m}/\text{m}$]	Indikované přetvoření

$\varepsilon_{I,II}$	[$\mu\text{m}/\text{m}$]	Hlavní přetvoření
ε_{II}	[$\mu\text{m}/\text{m}$]	Hlavní přetvoření II
η	[-]	Nelineární člen
σ	[MPa]	Normálové napětí
σ	[MPa]	Obecné napětí
σ_1	[MPa]	Maximální hlavní napětí
σ_2	[MPa]	Střední hlavní napětí
σ_3	[MPa]	Minimální hlavní napětí
σ_I	[MPa]	Hlavní napětí I
$\sigma_{I,II}$	[MPa]	Hlavní napětí
σ_{II}	[MPa]	Hlavní napětí II
σ_k	[MPa]	Mez kluzu
σ_{\max}	[MPa]	Maximální hlavní napětí
σ_{\min}	[MPa]	Minimální hlavní napětí
σ_{red}	[MPa]	Redukované napětí
σ_x	[MPa]	Složka napětí v ose x
σ_y	[MPa]	Složka napětí v ose y
τ	[MPa]	Smykové napětí
φ_1	[°]	Úhel mezi hlavním napětím (σ_1, σ_2) a napětím v ose (σ_x, σ_y)
χ	[-]	Hodnota aproximace
ψ	[°]	Pomocný úhel pro výpočet úhlu α

SEZNAM OBRÁZKŮ

- Obr. 2.1: Schéma Francisovy turbíny [34]
Obr. 2.2: Model Francisovy turbíny v programu Solidworks
Obr. 2.3: Letecký pohled na Lipenskou přehradu [44]
Obr. 2.4: Letecký pohled na hráz Lipenské přehrady [44]
Obr. 2.5: Sensitivní mapa VE Lipno I – dispoziční uspořádání [40]
Obr. 2.6: Řez podzemí VE Lipno I [11]
Obr. 2.7: Propagační plakát z doby budování VE Lipno I
Obr. 2.8: Betonáž gravitačních bloků a příprava podloží pro sypání zemní hráze 1956 [49]
Obr. 2.9: Pohled na původní VT v roce 2012 [40]
Obr. 2.10: Pohled na spirální skříň v roce 2014 [23]
- Obr. 3.1: Grafické znázornění obecné napjatosti
Obr. 3.2: Grafické znázornění dvojosé napjatosti
Obr. 3.3: Grafická konstrukce Mohrovy kružnice [2]
Obr. 3.4: Grafické znázornění trojosé napjatosti a redukovaného napětí
Obr. 3.5: Průběh tahového (tlakového) diagramu u oceli [50]
- Obr. 4.1: Analogový a digitální signál
Obr. 4.2: Elektrický signál při různých frekvencích
Obr. 4.3: Ukázka spojitého periodického signálu
Obr. 4.4: Ukázka výsledků FFT
Obr. 4.5: Měřicí ústředna EMS DV 803 [64]
Obr. 4.6: Kovová skříň pro EMS DV 803
Obr. 4.7: Blokové schéma EMS DV 803 [64]
- Obr. 5.1: Poměrná deformace tenzometru [42]
Obr. 5.2: Hysterezní křivka [4]
Obr. 5.4: Konstrukční provedení drátkových tenzometrů
Obr. 5.5: Příložený tenzometr [4]
Obr. 5.6: Fóliový tenzometr firmy HBM [42]
Obr. 5.7: Polovodičový tenzometr VTS Zlín s podložkou [43]
Obr. 5.8: Tlakoměr VTS Zlín, kde je měrný člen z polovodičového tenzometru [43]
Obr. 5.9: Jednoosé tenzometry HBM [41]
Obr. 5.10: Tenzometrické kříže HBM [41]
Obr. 5.11: Zobrazení tenzometru a složek hlavních napětí (přetvoření) při vyhodnocení dvojosé napjatosti
Obr. 5.12: Tenzometrické růžice HBM [41]
Obr. 5.13: Tenzometrické řetězce HBM [42]
Obr. 5.14: Zařízení MTS 3000 [41]
Obr. 5.15: Zařízení MTS 3000 a tenzometrická růžice [42]
Obr. 5.16: Tenzometry pro určování zbytkového pnutí HBM [41] [42]
Obr. 5.17: Lepidlo HBM X60 [41]
Obr. 5.18: Lepidlo HBM Z70 [41]
Obr. 5.19: Lepidlo HBM EP310 [41]
Obr. 5.20: Lepidlo HBM EP250 [41]
Obr. 5.21: Tuhý tmel HBM AK22 [41]
Obr. 5.22: Silikonový tmel s hliníkovou fólií HBM ABM 75 [41]

- Obr. 5.23: Polyuretanový lak HBM PU120/140 [41]
Obr. 5.24: Nitrilová guma HBM NG150 [41]
Obr. 5.25: Silikonová pryskyřice HBM SL450 [41]
Obr. 5.26: Silikonová guma HBM SG250 [41]
Obr. 5.27: Zapojení Wheatstonova můstku
- Obr. 6.1: Grafické znázornění tlakových oblastí [52]
Obr. 6.2: Měřicí rozsahy tlakoměrů [55]
Obr. 6.3: Tlakový snímač BD Sensors DMP 333 [46]
Obr. 6.4: Kapacitní snímač tlaku Rosemount 3051S
Obr. 6.5: Ukázka štítku tlakového snímače [46]
Obr. 6.6: Blokové schéma snímače SMART [52]
Obr. 6.7: Snímač absolutního a relativního tlaku JSP-DMP 331/333 [45]
Obr. 6.8: Diferenční snímač tlaku Rosemount 2051CD PK s ventilovou soupravou [45]
Obr. 6.9: Ukázka přípojovacích možností tlakových snímačů [45]
Obr. 6.10: Ukázka vybraných konektorů [45]
Obr. 6.11: Ukázka dvou a třívodičového zapojení [45]
Obr. 6.12: Multifunkční kalibrátor Beamex MC6 [47]
Obr. 6.13: Ruční zdroj tlaku (pumpa) [47]
Obr. 6.14: Jednotlivé spojení ke sběrné trubce [13]
Obr. 6.15: Umístění snímačů při měření kapalin a plynů [53]
Obr. 6.16: Kondenzační smyčky [59]
- Obr. 7.1: Gaussovo (normální) rozdělení pravděpodobnosti [61]
Obr. 7.2: Rovnoměrné rozdělení pravděpodobnosti [61]
Obr. 7.3: Trojúhelníkové rozdělení pravděpodobnosti [61]
- Obr. 8.1: Geometrie nepřesnosti nalepení tenzometru [35]
Obr. 8.2: Nerovný povrch měřeného místa [35]
- Obr. 9.1: Montáž spirální skříně v roce 1958 [48]
Obr. 9.2: Demontáž spirální skříně v roce 2012 [44]
Obr. 9.3: Pohled na měřenou spirálu
Obr. 9.4: Pohled na tlakový odběr a snímač tlaku
Obr. 9.5: Pohled na tenzometrickou růžici (směry růžice) - vybraný tenzometr
Obr. 9.6: Pohled na chráněný tenzometr – vybraný tenzometr
Obr. 9.7: Pohled na kulový uzávěr (zavřený)
Obr. 9.8: Pohled na řídicí systém elektrárny s parametry soustrojí
- Obr. 10.1: Tlaková zkouška spirální skříně [38]
Obr. 10.2: Smontovaná a zabetonovaná spirální skříň [39]
Obr. 10.3: Pohled na měřenou spirálu
Obr. 10.4: Pohled na kulový uzávěr (otevřený)
Obr. 10.5: Pohled na umístění tenzometru (směry růžice) – umístění 1-1
Obr. 10.6: Pohled na tenzometrickou růžici (detail) – vybraný tenzometr
Obr. 10.7: Pohled spirálu a tlakový odběr
Obr. 10.8: Pohled na tlakový odběr (sběrné potrubí) a snímač tlaku

SEZNAM TABULEK

Tab. 4.1: Vybrané měřicí systémy

Tab. 4.2: Parametry a vlastnosti měřicí ústředny EMS DV 803 [64]

Tab. 7.1: Používané aproximace

Tab. 8.1: Definované nejistoty měření pro zatěžovací cykly jednotlivých lepidel [41]

Tab. 8.2: Ukázka bilanční tabulky při výpočtu nejistoty pro přetvoření

Tab. 8.3: Ukázka bilanční tabulky při výpočtu nejistoty pro napětí

Tab. 9.1: Základní technické parametry turbíny před GO

Tab. 9.2: Mechanické vlastnosti použitých materiálu na výrobu spirální skříně [21]

Tab. 9.3: Nezávislé materiálové vlastnosti použitých materiálů

Tab. 9.4: Hodnoty pro výpočet hlavních přetvoření, napětí a redukovaného napětí

Tab. 9.5: Bilanční tabulka nejistot měření přetvoření

Tab. 9.6: Hodnoty pro rozbor výpočtu nejistoty měření

Tab. 9.7: Bilanční tabulka nejistot měření napětí σ_I

Tab. 9.8: Bilanční tabulka nejistot měření napětí σ_{II}

Tab. 9.9: Bilanční tabulka nejistot měření redukovaného napětí σ_{red}

Tab. 10.1: Základní technické parametry turbíny po GO [27]

Tab. 10.2: Mechanické vlastnosti použitých materiálu na výrobu spirální skříně [7] [27]

Tab. 10.3: Nezávislé materiálové vlastnosti použitých materiálů

Tab. 10.4: Přehled vybraných stavů během zkoušek

Tab. 10.5: Hodnoty pro výpočet hlavních přetvoření, napětí a redukovaného napětí

Tab. 10.6: Bilanční tabulka nejistot měření přetvoření

Tab. 10.7: Hodnoty pro rozbor výpočtu nejistoty měření

Tab. 10.8: Bilanční tabulka nejistot měření napětí σ_I

Tab. 10.9: Bilanční tabulka nejistot měření napětí σ_{II}

Tab. 10.10: Bilanční tabulka nejistot měření redukovaného napětí σ_{red}

SEZNAM GRAFŮ

Graf 8.1: Ukázka sloupcového grafu pro vypočtené nejistoty přetvoření (napětí)

Graf 9.1: Grafické vyjádření složek nejistot $u_{B\varepsilon}$

Graf 9.2: Grafické vyjádření složek nejistoty $u_{B\sigma_{I,II}}$

Graf 9.3: Grafické vyjádření složek nejistoty $u_{B\sigma_{red}}$

Graf 10.1: Grafické vyjádření složek nejistot $u_{B\varepsilon}$

Graf 10.2: Grafické vyjádření složek nejistoty $u_{B\sigma_{I,II}}$

Graf 10.3: Grafické vyjádření složek nejistoty $u_{B\sigma_{red}}$

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha A – Obecná část

1. Vltavská kaskáda
2. Parametry tenzometrických snímačů
3. Kritéria pro výběr tenzometrů HBM
4. Značení tenzometrů HBM
5. Postup při instalaci tenzometrů

Příloha B – Měření před generální opravou

1. Parametry použitých tenzometrických snímačů
2. Protokol o instalaci tenzometrických snímačů
3. Kalibrační list tlakového snímače p_1
4. Schéma rozmístění tenzometrů na spirále
5. Přehled stavů, které nastaly během měření – časový průběh
6. Přehled stavů, které nastaly během měření – tabulka
7. Výsledky měření – časové průběhy
8. Výsledky měření – časové průběhy detaily
9. Výsledky měření – porovnání stavů
10. Výsledky měření – tabulky (vybrané stavy)

Příloha C – Měření po generální opravě

1. Parametry použitých tenzometrických snímačů
2. Protokol o instalaci tenzometrických snímačů
3. Výsledky kalibrace tlakového snímače p_2
4. Schéma rozmístění tenzometrů na spirále
5. Přehled stavů, které nastaly během měření – časový průběh
6. Výsledky měření – časové průběhy
7. Výsledky měření – časové průběhy detaily
8. Výsledky měření – porovnání měřených míst
9. Výsledky měření – tabulky (vybrané stavy)

CD

1. Diplomová práce:
Mereni_napjatosti_na_spirale_vodni_turbiny_pomoci_tenzometru.pdf
2. Příloha:
Prilohy.pdf